

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Лабораторний практикум

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами
«Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» та
«Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей»
спеціальності 171 Електроніка*

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №7 від 13.05.2021 р.)

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Фізичні основи електроніки: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К.С. Дрозденко, Д.В.Паренюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,37 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №7 від 13.05.2021 р)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 03/2021 від 29.03.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Лабораторний практикум

Укладачі: *Дрозденко Катерина Сергіївна*, канд. техн. наук

Паренюк Дмитро Володимирович

Відповідальний
редактор

Найда С. А., д-р техн. наук, проф.

Рецензент:

Клен К.С., канд. техн. наук, доц., доцент кафедри електронних пристроїв та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського

Посібник містить теоретичні відомості та методичні вказівки до виконання лабораторних робіт, присвячених вимірюванню параметрів та дослідженню характеристик основних напівпровідникових елементів електронної техніки – діодів, стабілітронів, біполярних та польових транзисторів, а також найпростіших схем, що містять дані елементи. Запропоновані лабораторні роботи виконуються з використанням програми схемотехнічного комп'ютерного моделювання Multisim 10.1, яка дозволяє досліджувати фізичні процеси в електричних колах за допомогою технології віртуальних приладів.

Посібник призначений для використання під час дистанційного навчання, матеріали, наведені в ньому можуть використовуватись для самостійної роботи студентів під час вивчення дисципліни, а також під час розробки та тестування електронних приладів або їх вузлів.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота 1. Знайомство з програмою схемотехнічного моделювання Multisim	5
Лабораторна робота 2. Експериментальне визначення параметрів напівпровідникових діодів. Дослідження послідовного і паралельного з'єднання діодів.....	24
Лабораторна робота 3. Дослідження одно- та двохнапівперіодних випрямлячів.....	34
Лабораторна робота 4. Дослідження параметричних стабілізаторів напруги	48
Лабораторна робота 5. Дослідження біполярних транзисторів.....	66
Лабораторна робота 6. Дослідження польових транзисторів	81
Додатки.....	94
Додаток Д.1. Розрахункові формули для лабораторної роботи №3.....	95
Додаток Д.2 Зразок оформлення титульного аркушу до звіту з лабораторної роботи.....	97
Список літератури.....	98

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Фізичні основи електроніки» відноситься до циклу базової підготовки. Вона має суттєве значення у формуванні професійних знань та умінь бакалаврів, які оволодівають спеціальністю 171 Електроніка за освітніми програмами «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей".

Дисципліна базується на знаннях, що набуті при вивченні відповідних розділів "Фізики" та "Вищої математики", тісно пов'язана з "Теорією електричних кіл" і є базовою для подальшого вивчення кредитних модулів "Схемотехніка" та "Основи конструювання в електроніці".

В рамках вивчення "Фізичних основ електроніки" навчальним планом передбачені лабораторні роботи, основним завданням яких є закріплення знань, здобутих під час лекційних занять, дослідження основних напівпровідникових приладів з метою практичного підтвердження окремих теоретичних положень, отримання навичок роботи з лабораторним обладнанням, оснащенням, вимірювальною апаратурою, оволодіння методикою експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів.

Кожна лабораторна робота містить короткі теоретичні відомості стосовно елементу або схеми, яку студенти будуть досліджувати, контрольні питання, порядок виконання роботи, рекомендації щодо обробки отриманих експериментальних даних, вимоги до змісту звіту, а також посилання на літературні джерела.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ЗНАЙОМСТВО З ПРОГРАМОЮ СХЕМОТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ MULTISIM

Мета роботи – знайомство з програмним забезпеченням Multisim 10.1, дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових діодів за різних температур.

Пристрої та елементи

Джерело постійної напруги, джерело змінної напруги, джерело змінного струму, заземлення – група елементів **Sources**;

Мультиметр – панель приладів;

Резистори – група елементів **Basic**;

Діоди – група елементів **Diodes**;

Амперметр, вольтметр – група елементів **Indicators**.

Короткі теоретичні відомості

Комп'ютерне моделювання електричних схем та пристроїв широко використовується для дослідження фізичних процесів, що відбуваються в них, а також проведення аналізу складних взаємозв'язків між їх окремими компонентами в процесі розробки радіоелектронної апаратури.

Схемотехнічне комп'ютерне моделювання може бути проведене за допомогою різноманітних програм, зокрема, Multisim, Micro-Cap V, PSpice, DesignLab, APLAC, System View, Electronics Workbench, CircuitMaker, Tanner T-Spice та ін.

Середовище Multisim дозволяє об'єднати процеси розробки електронних пристроїв і тестування на основі технології віртуальних приладів. База даних

компонентів містить більше ніж 1200 SPICE-моделей елементів від провідних виробників, таких як Analog Devices, Linear Technology і Texas Instruments.

Бібліотеки (бази даних) компонентів Multisim. Головне вікно програми Multisim показано на рис. 1.1.

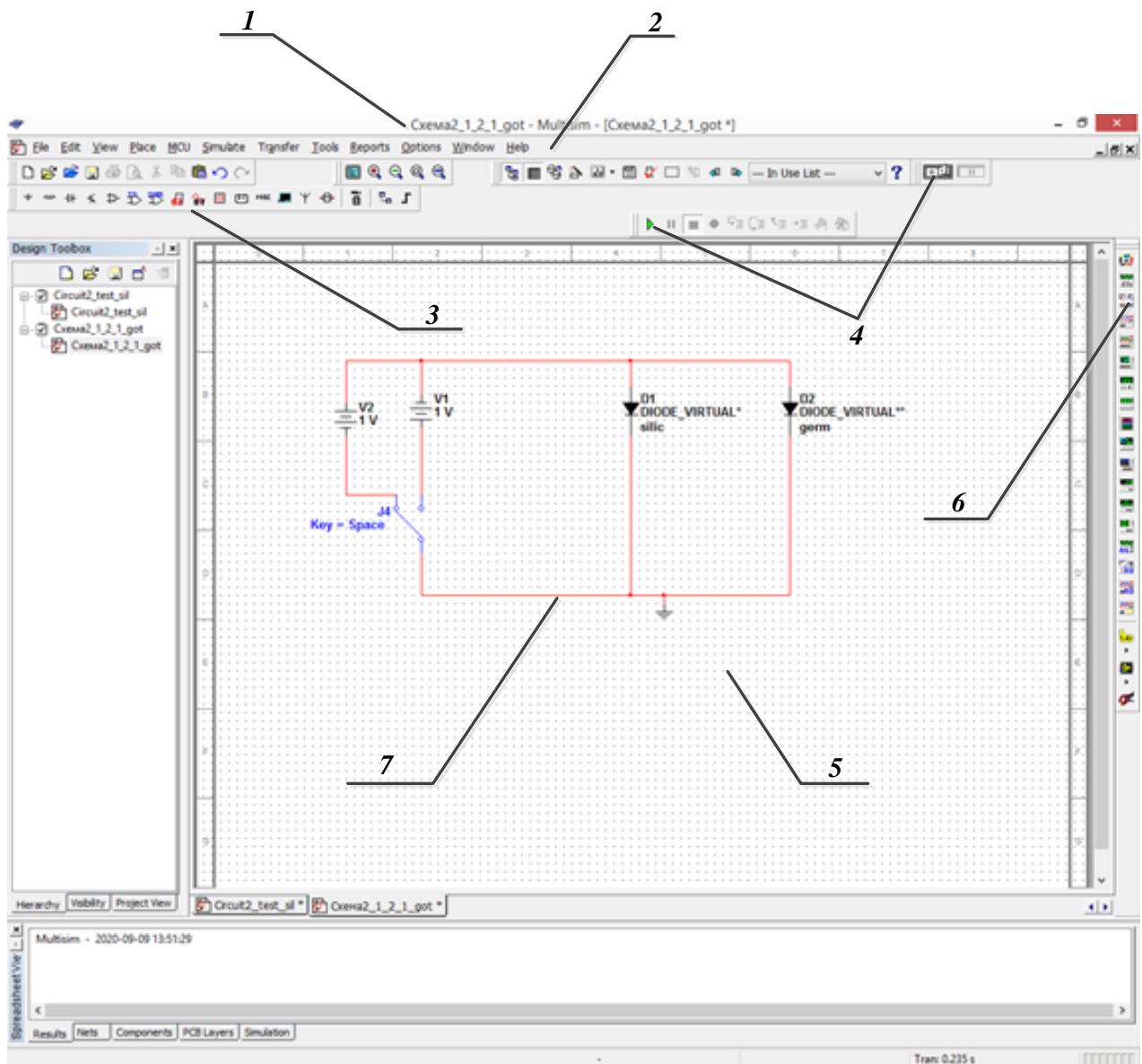


Рис. 1.1. Робоче вікно Multisim:

- 1– рядок заголовку; 2 – командний рядок; 3 – бібліотеки елементів та пристроїв;
4 – органи запуску, зупинки або паузи симуляції; 5 – робоче поле програми; 6 –
панель приладів; 7 – змодельована схема

Воно містить ряд елементів і полів, які мають те ж призначення, що і в вікні Windows. Тому на них докладно зупинятися не будемо. Крім того, далі наведемо

опис лише тих елементів і компонентів програми, які будуть використовуватися в лабораторних роботах.


У робочому полі програми розташовується змодельована схема з підключеними до неї контрольно-вимірювальними приладами. При необхідності кожен з приладів може бути розгорнутий для установки режимів його роботи і спостереження результатів.

Рядок заголовку – рядок з ім'ям файлу та програми. Командний рядок – рядок з пунктами головного меню, який відкриває доступ до підменю з наявними у програмі командами (після клацання мишкою по будь-якому пункту головного меню випадає відповідне підменю). Панель приладів – перелік доступних у програмі вимірювальних приладів.

Бібліотека компонентів містить наступні розділи:


- 1)  **Sources** – джерела енергії, заземлення.

Параметри джерел енергії задаються в діалоговому вікні (викликається подвійним клацанням мишки по іконці джерела).

- 2)  **Basic** – основні пасивні елементи схемотехніки – резистори, конденсатори, котушки індуктивності, ключі, трансформатори, реле. Також тут можна знайти ідеальні компоненти, параметри яких задаються користувачем.

- 3)  **Diodes** – різні види діодів – фотодіоди, діоди Шоткі, світлодіоди тощо.

- 4)  **Transistors** – біполярні і польові транзистори.

- 5)  **Indicators** – цифрові вимірювальні прилади (вольтметри, амперметри).

Вольтметр (рис. 1.2) дозволяє вимірювати напругу в режимі постійного або змінного струму.

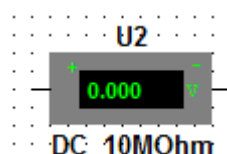


Рис. 1.2. Вигляд вольтметра в робочому полі Multisim

Подвійним клацанням миші на іконці вольтметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів вольтметра – виду вимірюваної напруги (змінна чи постійна) і величини внутрішнього опору. Величина внутрішнього опору вводиться з клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваної напруги (опція Mode) обирається зі списку (АС – змінна напруга, DC – постійна) . При вимірюванні змінної гармонічної напруги (АС) вольтметр показує діюче значення напруги U_o , пов'язане з амплітудним значенням U_m формулою $U_o = U_m / \sqrt{2}$.

Амперметр (рис. 1.3) дозволяє вимірювати постійний або змінний струм. Є можливість вибору режиму вимірювання та внутрішнього опору (налаштування проводяться аналогічно вольтметру).

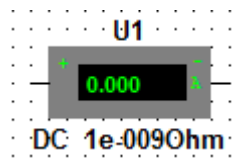


Рис. 1.3. Вигляд амперметра в робочому полі Multisim

Панель контрольно-вимірювальних приладів містить:

1) **Мультиметр** – використовується для вимірювання постійної та змінної напруги, постійного і змінного струму, опору, затухання в децибелах.

Для настройки мультиметра потрібно подвійним клацанням миші на його іконці відкрити збільшене зображення (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Вікно налаштувань мультиметра

На цьому зображенні натисканням лівої кнопки миші обрати за одиницями вимірювання ту величину, яку потрібно виміряти: A – струм, V – напруга, Ω –

опір, або dB – затухання; вид сигналу (змінний або постійний); режим установки параметрів мультиметра (Settings).

При вимірюванні струму мультиметр підключається послідовно в вітку схеми, в якій потрібно виміряти струм. При цьому результатом вимірювань змінного струму є ефективне (діюче) значення.

При вимірюванні напруги мультиметр підключається паралельно ділянці схеми, на якій необхідно виміряти падіння напруги. При цьому результатом вимірювань змінної напруги є ефективне (діюче) значення.

При роботі мультиметра в режимі омметра він підключається паралельно ділянці кола, на якій необхідно виміряти опір.

2) **Осцилограф** – універсальний прилад, що дозволяє наочно спостерігати розгортку сигналів у часі. Діалогове вікно осцилографа відкривається подвійним клацанням миші на його іконці (рис. 1.5).

Режим розгортки обирається кнопками Y/T, B/A, A/B. У режимі Y/T реалізуються наступні режими розгортки: по вертикалі – напруга сигналу, по горизонталі – час. В режимі B/A: по вертикалі – сигнал каналу B, по горизонталі – сигнал каналу A.

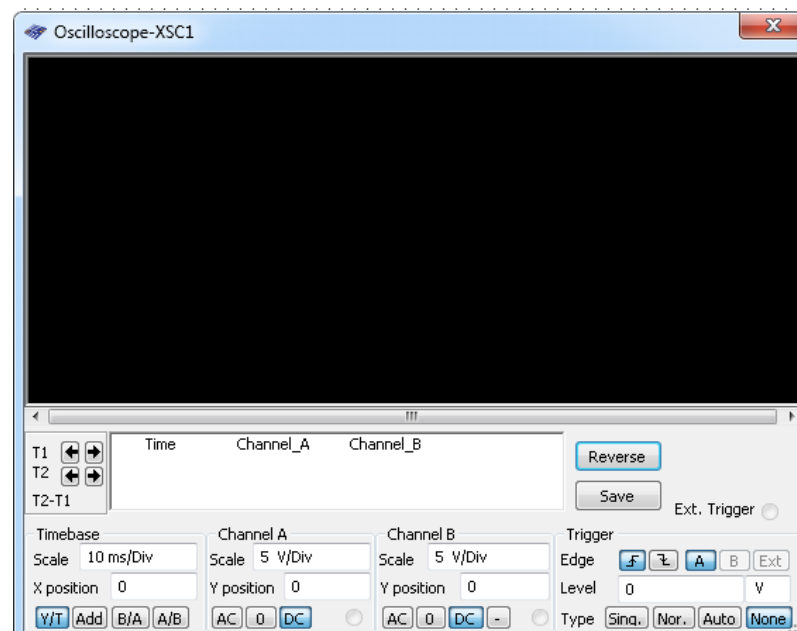


Рис. 1.5. Діалогове вікно осцилографа


В режимі A/B: по вертикалі – сигнал каналу А, по горизонталі – сигнал каналу В. В режимі Y/T тривалість розгортки (TIME BASE) може бути задана в діапазон від 1 fs / поділку до 1000 Tc / поділку з можливістю установки зміщення в тих же одиницях по горизонталі, тобто по осі X (X POSITION).



На екрані осцилографа розташовані два курсори, які позначаються цифрами 1 та 2, з їхньою допомогою можна вимірювати миттєві значення напруг у будь-якій точці осцилограми. Для цього потрібно перетягнути мишею курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення. Координати точок перетинання першого курсору з осцилограмами відображаються на лівому табло, координати другого курсору – на середньому табло. На правому табло відображаються значення різниці між відповідними координатами першого і другого курсорів.

Зображення можна інвертувати натисканням кнопки REVERSE і записувати дані в файл натисканням кнопки SAVE.

Створення і редагування схем в Multisim. У загальному випадку процес створення схеми починається з розміщення на робочому полі компонентів з бібліотек програми, установки значень їх параметрів, підключення вимірювальних пристроїв та їх налаштування відповідно до поставленого завдання. Після розміщення компонентів поводитьсь з'єднання їхніх виводів провідниками. При цьому необхідно враховувати, що до виводу компонента можна підключити тільки один провідник. Для під'єднання необхідно виділити один з виводів компонента лівою кнопкою миші і не відпускаючи її з'єднати з виводом іншого необхідного компонента.

Якщо з'єднання необхідно розірвати, курсором виділяється необхідний провідник і натискається кнопка Delete. Якщо необхідно підключити вивід до наявного на схемі провідника, то провідник від виводу компонента курсором підводиться до зазначеного провідника і після появи точки з'єднання кнопка миші відпускається.

Обов'язковою на схемі є наявність елемента загального проводу , який знаходиться в розділі Sources. Вмикання / вимикання змодельованої схеми

здійснюється кнопкою , за допомогою панелі  або у меню Simulate (рис. 1.6).

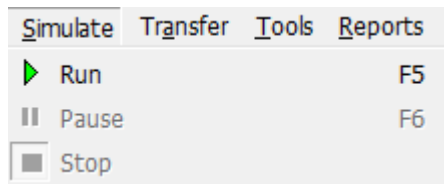


Рис. 1.6. Меню Simulate

В даній лабораторній роботі знайомство з програмним забезпеченням Multisim відбуватиметься в процесі дослідження температурної залежності ВАХ діодів.

Напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом і двома зовнішніми виводами. Призначення діода – перетворення змінної напруги промислової частоти (50 Гц або 400 Гц) в постійну.

Основними параметрами, які характеризують випрямні діоди (рис. 1.7), є:

- максимальний прямий струм $I_{\text{пр max}}$;
- падіння напруги на діоді при заданому значенні прямого струму $I_{\text{пр}}$ ($U_{\text{пр}} \approx 0,3 \dots 0,6$ В для германієвих діодів і $U_{\text{пр}} \approx 0,7 \dots 1,2$ В – для кремнієвих);
- максимально допустима постійна зворотна напруга діода $U_{\text{зв max}}$;
- зворотний струм $I_{\text{зв}}$ при заданій зворотній напрузі $U_{\text{зв}}$;
- бар'єрна ємність діода під час подачі на нього зворотної напруги деякої величини;
- найбільша допустима потужність розсіювання – допустиме значення потужності розсіювання, при якій забезпечується задана надійність при тривалій роботі діода;
- діапазон частот, в якому можлива робота діода без суттєвого зниження випрямленого струму;
- робочий діапазон температур (германієві діоди працюють в діапазоні

-60...+70 °С, кремнієві – в діапазоні -60...+150 °С, що пояснюється малими зворотними струмами даних діодів).

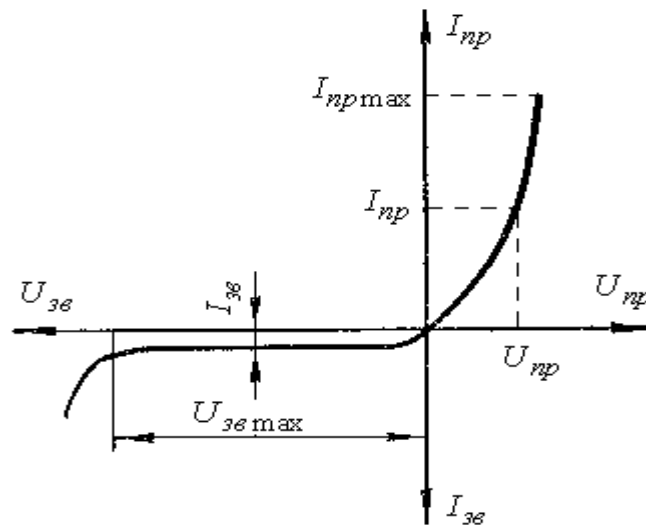


Рис. 1.7. ВАХ і основні параметри випрямних діодів

Кремнієві діоди. На електропровідність напівпровідників значно впливає температура навколишнього середовища. При підвищенні температури підсилюється генерація пар носіїв заряду, тобто збільшується концентрація носіїв і провідність росте. Температурна залежність ВАХ кремнієвого діода показана на рис. 1.8. При прямих струмах пряме падіння напруги зменшується зі збільшенням температури.

Кремнієві діоди розраховані на різні припустимі прямі струми – від 0,5 до 1600 А. Падіння напруги на діодах при цих струмах зазвичай не перевищує 1,5 В. Зворотна вітка ВАХ кремнієвих діодів не має ділянки насичення зворотного струму, оскільки зворотний струм в кремнієвих діодах викликаний в основному процесом генерації носіїв у *p-n*-переході. Припустима зворотна напруга кремнієвих діодів – до 1600 В. Зі збільшенням температури пробивна напруга збільшується.

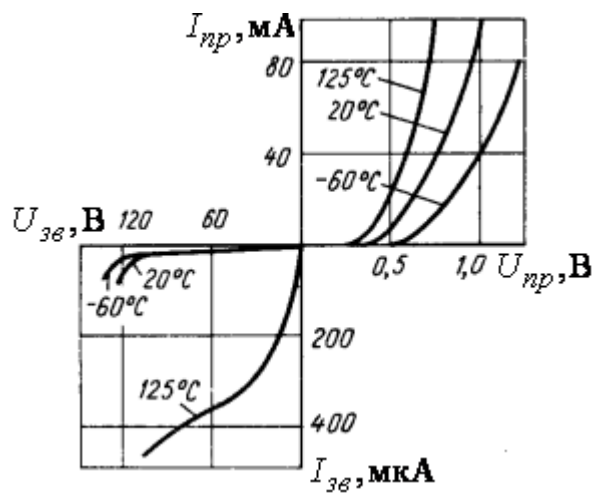


Рис. 1.8. Вольт-амперні характеристики кремнієвого випрямного діода при різних температурах навколишнього середовища

Германієві діоди. Температурна залежність ВАХ германієвого діода показана на рис. 1.9.

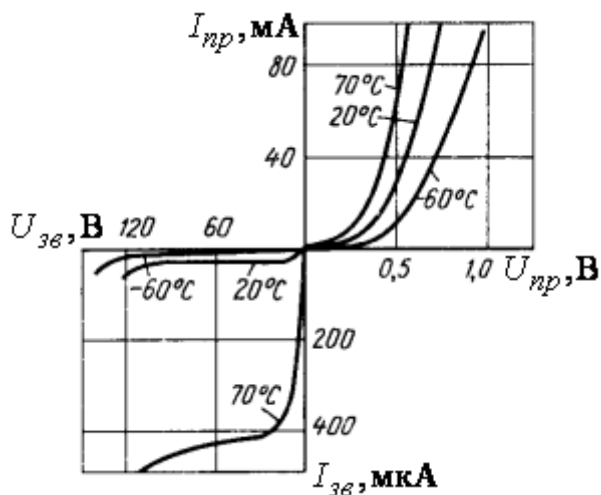


Рис. 1.9. Вольт-амперні характеристики германієвого діода при різних температурах навколишнього середовища

Зворотна вітка ВАХ германієвих діодів має ділянку насичення, яка продовжується до значень зворотніх напруг, що не перевищують 400 В. При більших напругах настає пробій, що має тепловий характер. Пробивна напруга зменшується з підвищенням температури.

Контрольні питання

1. Опишіть процес формування моделі в середовищі Multisim.
2. Як активувати процес симуляції у Multisim?
3. Що називається напівпровідниковим діодом? Умовне графічне позначення напівпровідникового діода.
4. Назвіть область застосування напівпровідникових діодів.
5. Що називають вольт-амперною характеристикою напівпровідникового діода.
6. Назвіть робочі температури різних типів діодів.
7. Чи залежать властивості напівпровідникових діодів від температури? Якщо так, то яким чином?

Підготовка до виконання лабораторної роботи

Вивчити теоретичні відомості і дати відповіді на контрольні запитання.

Порядок виконання роботи

1. **Створити модель, показану на рис. 1.10.**

Для цього використати бібліотеки Sources (рис.1.11), Basic (рис.1.12) та Diodes (рис.1.13).

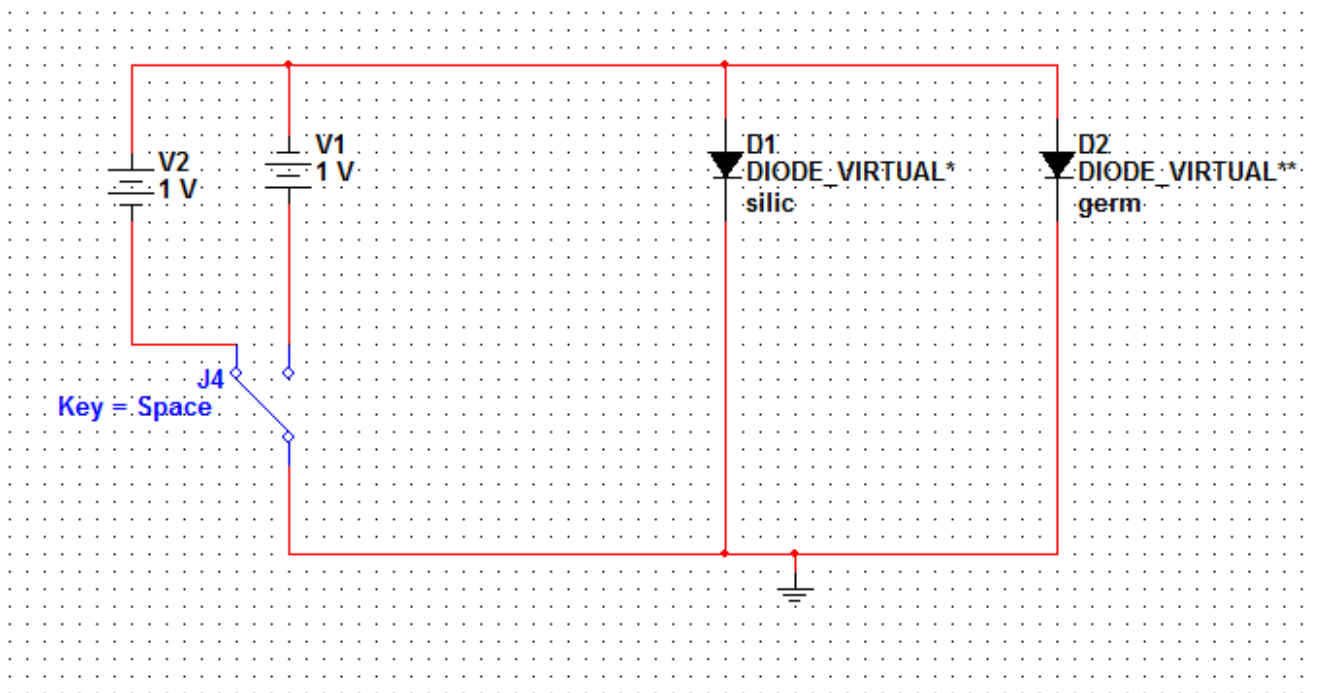


Рис. 1.10. Схема моделювання

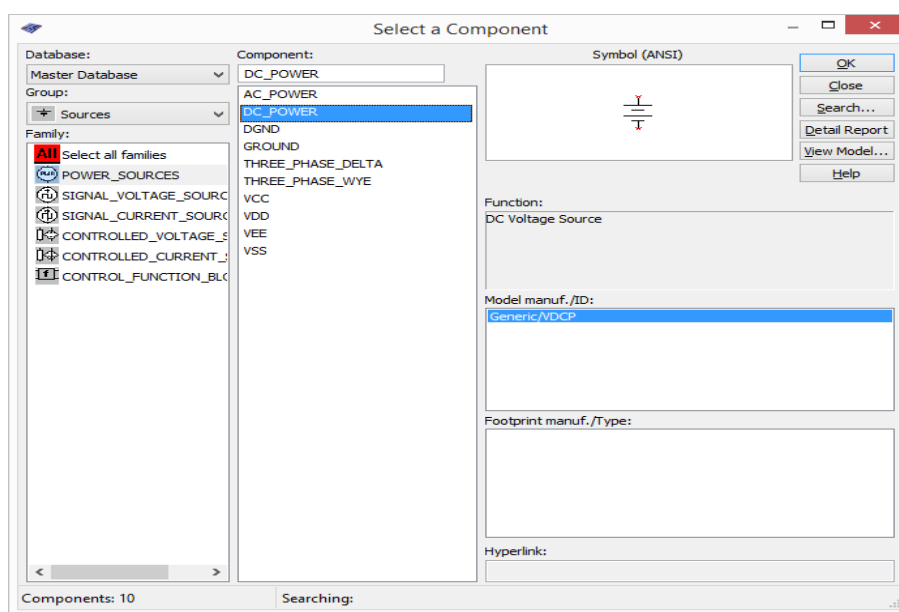


Рис. 1.11. Бібліотека Sources

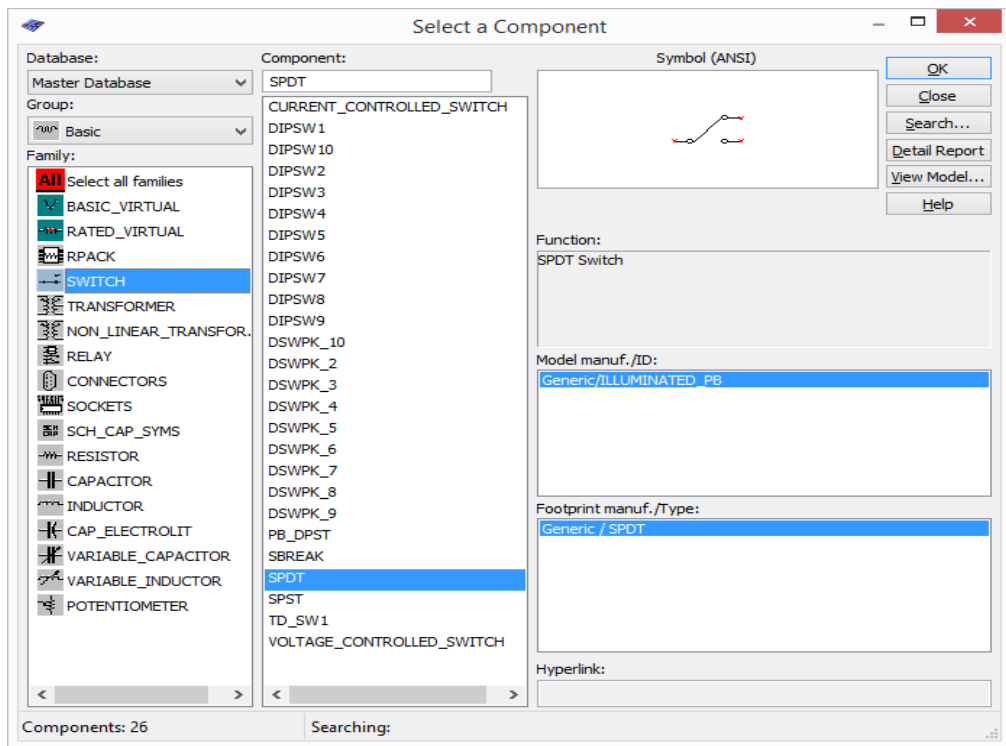


Рис. 1.12. Бібліотека Basic

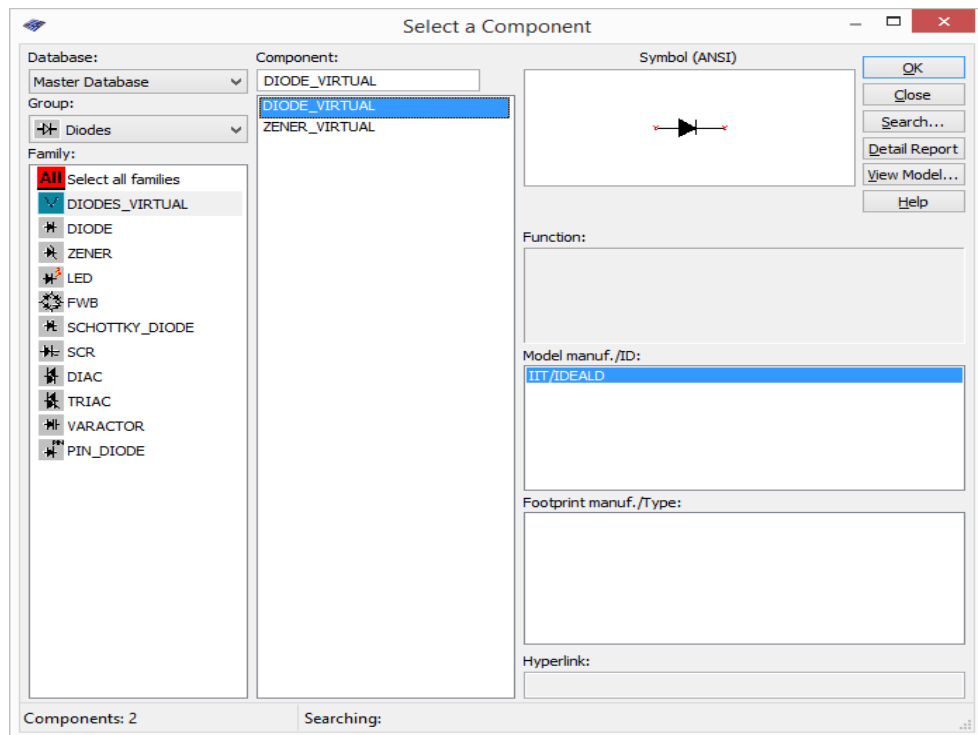
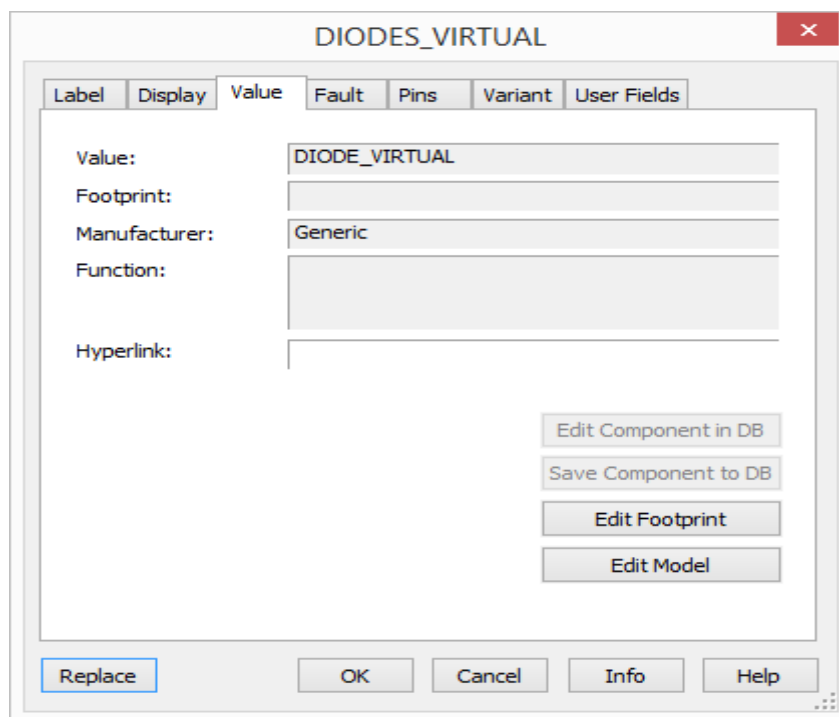


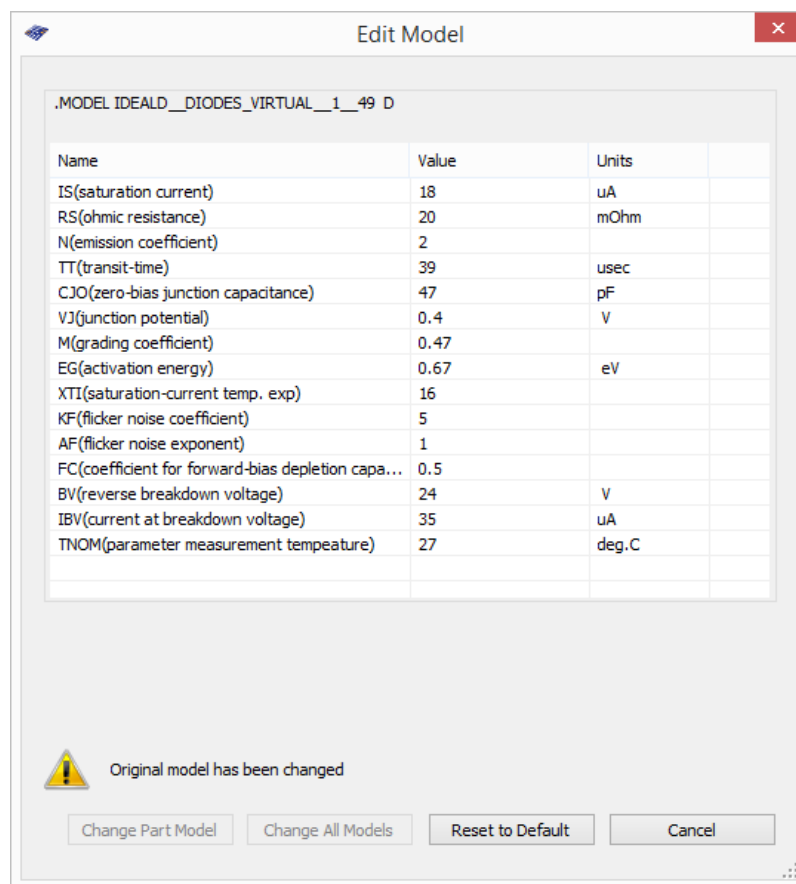
Рис. 1.13. Бібліотека Diodes

Для того, щоб задати параметри діода потрібно двічі натиснути на нього лівою кнопкою миші. При цьому відкриється вікно, показане на рис. 1.14, а. Натисканням **Edit Model**, відкрити вікно (рис. 1.14, б), в якому встановити

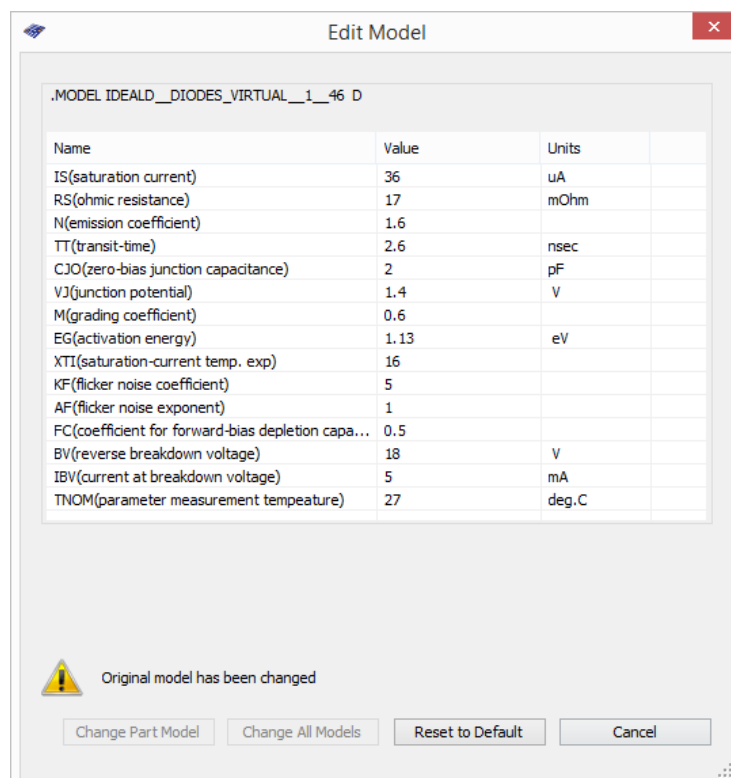
наступні налаштування: для діоду D1 (кремнієвого) – як зазначено на рис. 1.14, б; для діоду D2 (германієвого) – відповідно до рис. 1.14, в. Параметр «зворотна напруга пробою» BV (reverse breakdown voltage) встановити відповідно до номеру варіанту N: $BV = 30-N$ для германієвого діоду (D2) і $BV = 40-N$ для кремнієвого діоду (D1) .



a



б



в

Рис. 1.14. Налаштування характеристик діодів

2. Отримати ВАХ германієвого і кремнієвого діодів за температури 20⁰С.

2.1. Пряма вітка ВАХ

У меню Simulate, підменю Analyses активувати пункт DC Sweep (рис. 1.15).

Задати параметри симуляції – у вкладці Analysis Parameters у пункті Source встановити значення vv2 (джерело напруги №2) та діапазон значень напруги від 0 до 1 В з кроком не менше ніж 0,1 В (рис.1.16).

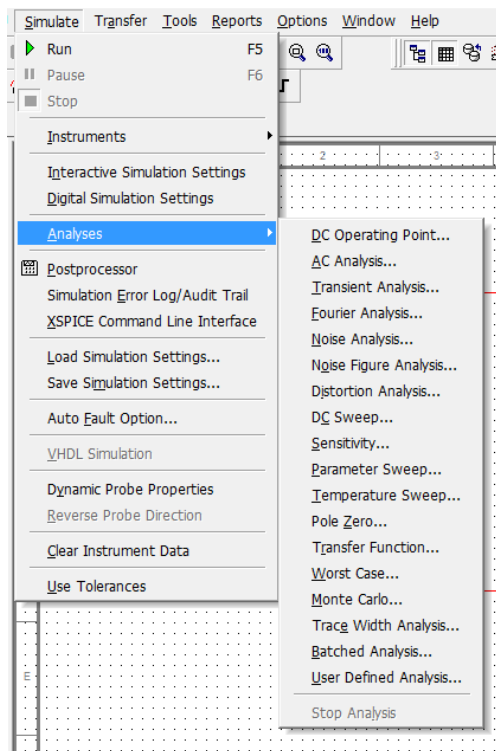


Рис.1.15. Меню Simulate

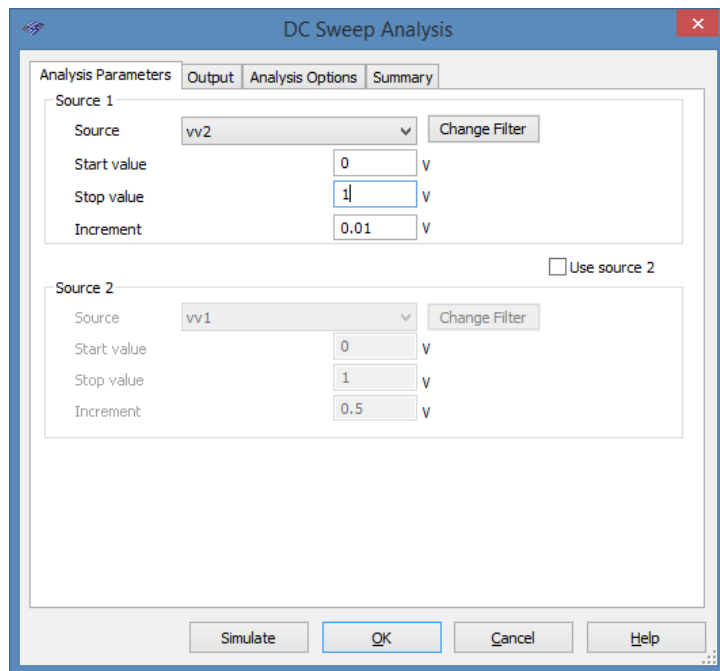
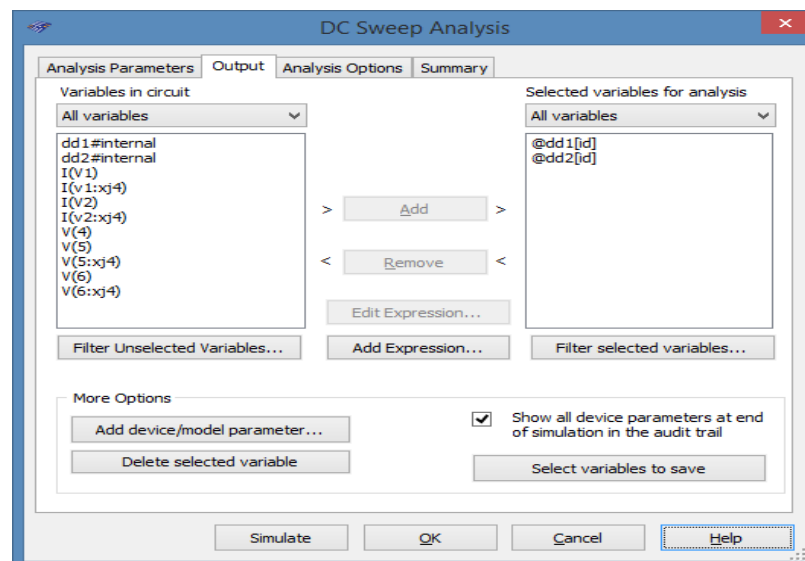
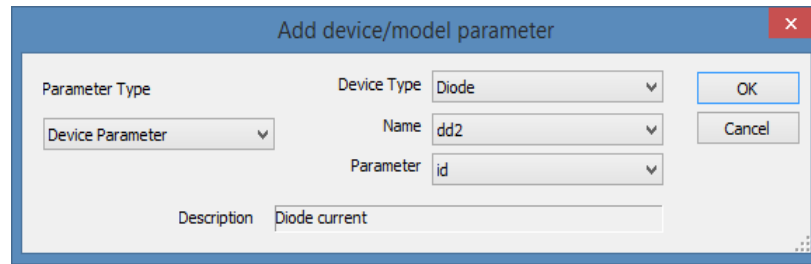


Рис. 1.16. Вкладка Analysis Parameters

У вкладці Output додати у поле «Selected variables for analysis» параметр «Diode current» для першого та другого діоду (@dd1[id] та @dd2[id], де dd1 – номер діоду у схемі симуляції, [id] – шифр параметру «Diode current») з лівого списку в правий за допомогою кнопки «Add». У випадку їх відсутності потрібно створити дані параметри в ручному режимі: перейти в пункт «Add device/model parameter», далі обрати у вкладці «Name» необхідний діод, а потім у вкладці «Parameter» встановити параметр «id» (мати на увазі, що у полі «Description» має бути вказано «Diode current» (рис.1.17 а,б).



а



б

Рис.1.17. Вкладка Output

Запустити симуляцію. На моніторі з'явиться наступне зображення (рис.1.18):

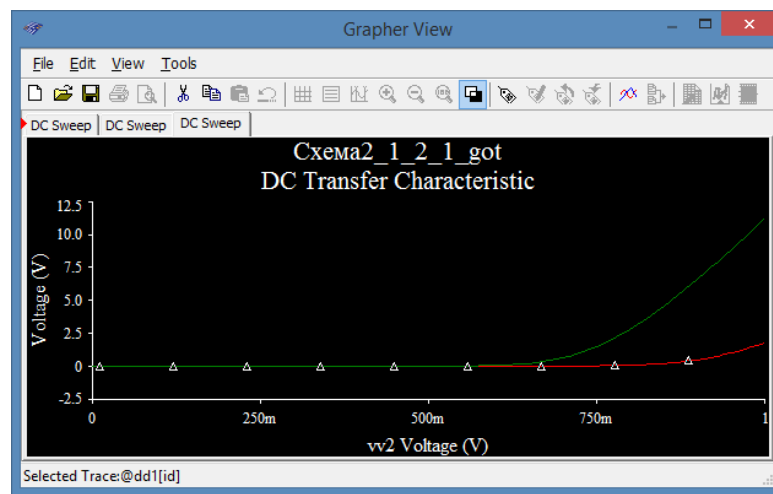


Рис.1.18. Вигляд прямої вітки ВАХ діодів, побудованої за допомогою Grapher

Для підготовки зображення до збереження, у вікні Grapher необхідно вимкнути реверс кольорів, увімкнути відображення сітки та легенди (рис.1. 19).

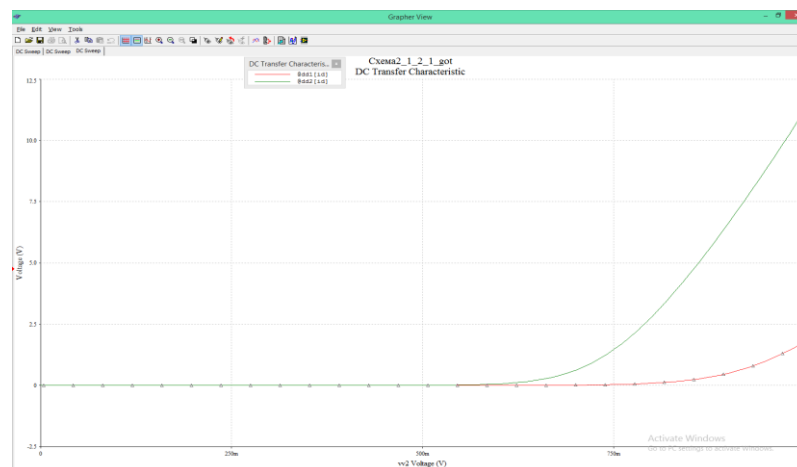


Рис.1. 19 Grapher

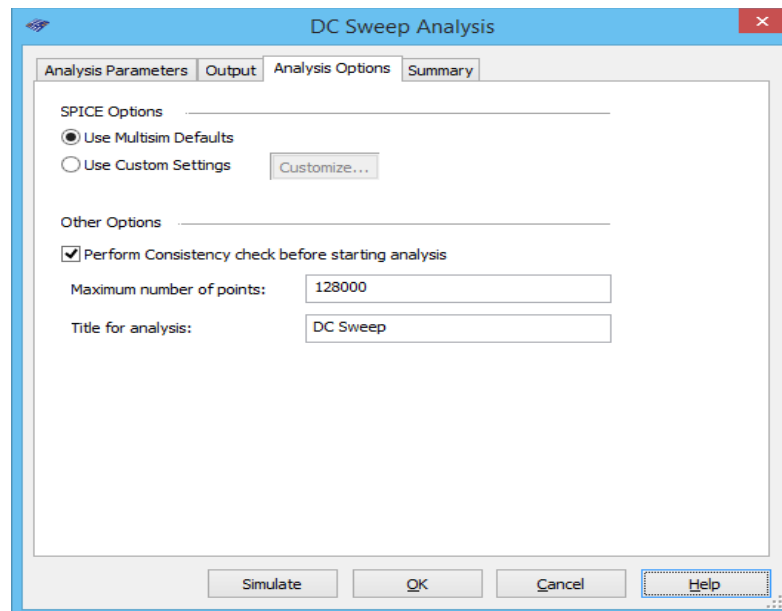
Зберегти отримані результати.

2.2. Зворотна вітка ВАХ

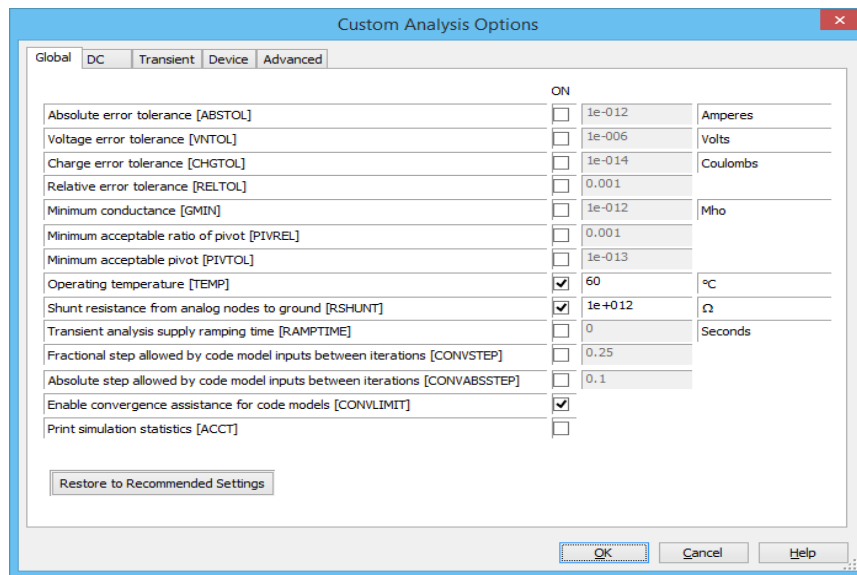
На схемі моделювання змінити положення ключа, а на вкладці «Analysis Parameters» – vv1 (джерело напруги №1). Повторити дії, описані в п. 2.1 для діапазону напруг від 0 до 1 В, а потім від 0 до 80 В.

3. Отримати ВАХ германієвого і кремнієвого діодів за температури 60⁰С.

Для зміни температури у вкладці Analysis Options потрібно активувати пункт Use Custom Settings і, натиснувши на пункт Customise, активувати прапорець напроти пункту Operating Temperature (Temp). У полі, що з'явилося, встановити значення 60⁰С (рис.1.20 а,б). Вийти з меню налаштувань і виконати дії, описані в п. 2.



а



б

Рис.1.20. Налаштування температури

Обробка отриманих результатів

- 1) Згрупувати збережені зображення таким чином, щоб отримати ВАХ діодів, аналогічні рис. 1.7-1.9.
- 2) Зробити висновки по роботі, оформити звіт.

Зміст звіту

1. Схема проведення експерименту (файл Multisim).
2. Графіки ВАХ германієвого та кремнієвого діодів при температурі 20⁰С.
3. Графіки ВАХ германієвого та кремнієвого діодів при температурі 60⁰С.
4. Висновки по роботі.

Література

Л [1] с. 50-56; Л [2] с. 30-33; Л [6] с. 38-42; Л [7]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО І ПАРАЛЕЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ ДІОДІВ

Мета роботи – моделювання і дослідження характеристик найпростіших схем з використанням напівпровідникових діодів.

Пристрої та елементи

Джерело постійної напруги, джерело змінної напруги, джерело змінного струму, заземлення – група елементів **Sources**;

Мультиметр – панель приладів;

Резистори – група елементів **Basic**;

Діоди – група елементів **Diodes**;

Амперметр, вольтметр – група елементів **Indicators**.

Короткі теоретичні відомості

Основними параметрами, які характеризують випрямні діоди (рис. 2.1), є:

- максимальний прямий струм $I_{\text{пр max}}$;
- падіння напруги на діоді при заданому значенні прямого струму $I_{\text{пр}}$ ($U_{\text{пр}} \approx 0,3 \dots 0,6$ В для германієвих діодів і $U_{\text{пр}} \approx 0,7 \dots 1,2$ В – для кремнієвих);
- максимально припустима постійна зворотна напруга діода $U_{\text{зв max}}$;
- зворотний струм $I_{\text{зв}}$ при заданій зворотній напрузі $U_{\text{зв}}$;
- бар'єрна ємність діода під час подачі на нього зворотної напруги деякої величини;
- найбільша припустима потужність розсіювання – припустиме значення потужності розсіювання, при якій забезпечується задана надійність при тривалій роботі діода;

- діапазон частот, в якому можлива робота діода без суттєвого зниження випрямленого струму;
- статичний та диференціальний опір;
- робочий діапазон температур (германієві діоди працюють в діапазоні -60...+70 °С, кремнієві – в діапазоні -60...+150 °С, що пояснюється малими зворотними струмами даних діодів).

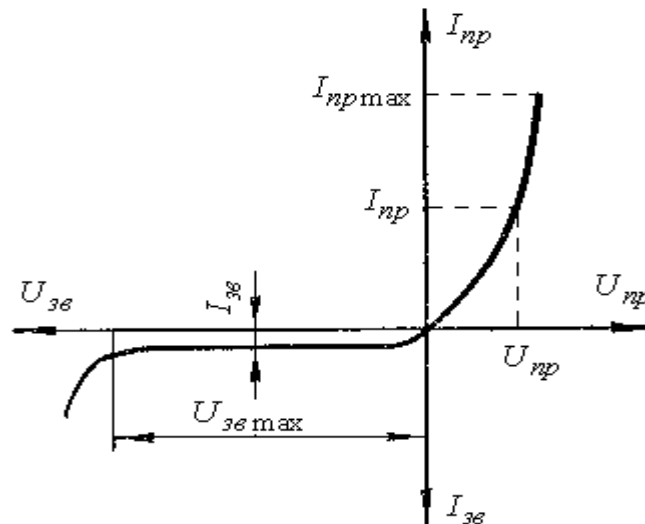


Рис. 2.1. ВАХ і основні параметри випрямних діодів

Більшість з вказаних параметрів зазначені в технічній документації на діод, деякі – вимірюються за допомогою вимірювальних приладів, а інші – визначаються опосередковано. До останніх належать статичний та диференціальний опір.

Статичний опір (опір постійному струму) характеризує втрати в діоді у певній робочій точці і визначається виразом:

$$R_{\text{ст}} = \frac{U}{I},$$

де U та I – напруга і струм певної точки на ВАХ.

Диференціальний (динамічний) опір – це відношення приросту напруги на діоді до приросту струму:

$$r_o = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

При випрямленні високої напруги з амплітудним значенням U_m при відсутності високовольтних діодів доводиться з'єднувати низьковольтні діоди послідовно (рис. 2.2).

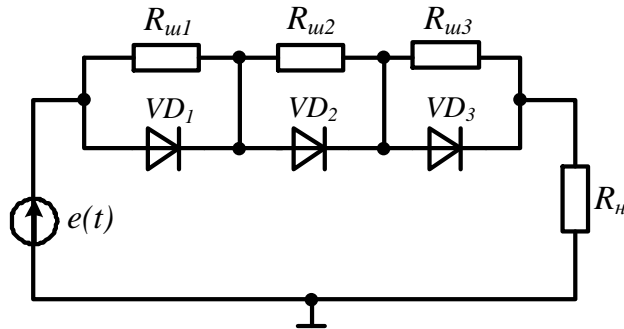


Рис. 2.2. Схема послідовного з'єднання діодів

Необхідна кількість діодів визначається за формулою

$$n = \frac{U_m}{k_U U_{звор. max}},$$

де k_U – коефіцієнт навантаження діодів по напрузі; $k_U \in [0,5 \dots 0,8]$.

Якщо отримане значення n дробове, округлюють до найближчого більшого цілого числа.

Різні екземпляри діодів одного типу мають великий розкид значень зворотних опорів і пробивних напруг. Крім того, зворотні вольт-амперні характеристики діодів по-різному можуть змінюватися при зміні температури і з часом. Все це призводить до того, що прикладена до послідовно з'єднаних діодів напруга виділяється в основному на діоді з найбільшим зворотним опором, при цьому вона може виявитися вище граничної $U_{звор. max}$. У результаті можливий незворотній пробій. Вихід з ладу одного з діодів в послідовному колі веде до пробою інших.

Для того, щоб зворотна напруга розподілялася рівномірно між діодами, незалежно від їх зворотних опорів, застосовують шунтування резисторами. Опори R_u резисторів повинні бути однакові і значно менше найменшого із зворотних

опорів діодів. Але разом з тим $R_{ш}$ не повинні бути занадто малими, щоб не погіршилося випрямлення.

$$R_{ш} \leq \frac{nU_{звор. max} - 1,1U_m}{(n-1)I_{звор. max}}.$$

Паралельне з'єднання діодів використовують в тому випадку, коли потрібно отримати прямий струм $I_{випр.}$, більший граничного струму одного діода $I_{пр. max}$ (рис. 2.3).

Необхідна кількість діодів визначається за формулою

$$n = \frac{I_{випр. m}}{k_I I_{пр. max}},$$

де k_I – коефіцієнт навантаження діодів по струму; $k_I \in [0,5...0,8]$.

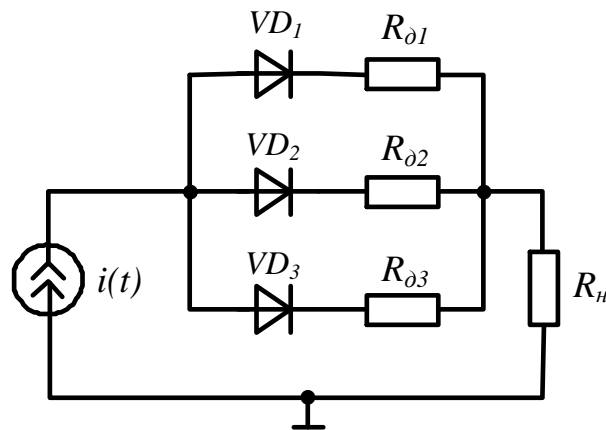


Рис. 2.3. Схема паралельного з'єднання діодів

Але якщо діоди одного типу просто з'єднати паралельно, то внаслідок розкиду прямих опорів у різних екземплярів діодів одного і того ж типу вони виявляться по-різному навантаженими і в деяких струм буде більше граничного. Для зрівняння струмів через діоди послідовно до кожного з них вмикають додаткові резистори R_{∂} .

$$R_{\theta} \geq \frac{U_{np}(n-1)}{nI_{np.\max} - 1,1I_{випр.т}}.$$

Підготовка до виконання лабораторної роботи

Вивчити теоретичні відомості і дати відповіді на контрольні запитання.

Порядок виконання роботи

1. Визначити статичний $R_{ст}$ та динамічний r_{θ} опори діода при прямому включенні.

Для цього зняти пряму вітку ВАХ напівпровідникового діода згідно свого варіанта (табл. 2.1) при стандартній температурі, змінюючи значення струму та вимірюючи відповідну напругу на діоді вольтметром. Результати вимірювань занести до табл. 2.2. Схема для проведення експерименту наведена на рис.2.4.

Таблиця 2.1

Індивідуальні завдання для виконання лабораторної роботи

Номер варіанту	Назва діоду	Номер варіанту	Назва діоду
1-3	1N4001	16-18	1N4933
4-6	BA157GP	19-21	1N4937
7-9	BYV10-20	22-24	1N5400
10-12	BYV27-100	25	1N5406
13-15	BYV28-200		

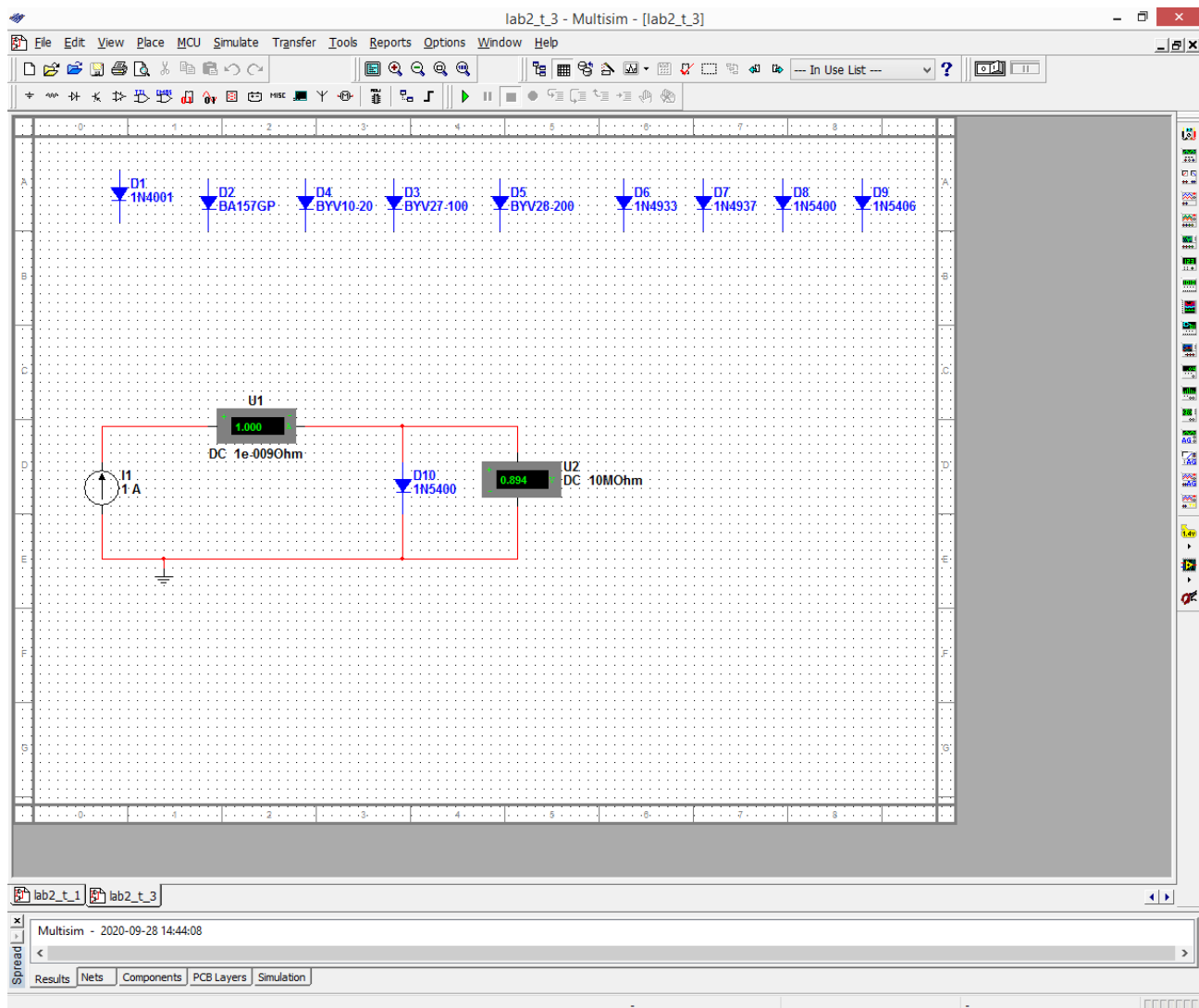


Рис.2.4. Схема для зняття прямої вітки ВАХ діода

Таблиця 2.2

Пряма вітка вольт-амперної характеристики діода

$I_{пр}, A$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$U_{пр}, мВ$						

За даними табл. 2.2 побудувати пряму вітку ВАХ напівпровідникового діода. Визначити статичний $R_{ст}$ та динамічний r_d опори діода при прямому ввімкненні та значенні струму $I = 0.6A$. Отримані значення занести до табл. 2.3.

Отримані значення опорів

Параметр	
$R_{ст}, \text{ Ом}$	
$r_{\theta}, \text{ Ом}$	

2. Дослідження послідовно з'єднаних діодів

Розрахуйте схему електричного кола для випрямлення синусоїдної напруги з параметрами, заданими в табл. 2.4 згідно номеру варіанта, використовуючи діоди BA157GP ($U_{звор.мах} = 100\text{В}$ та $I_{звор.мах} = 100\text{мкА}$).

Таблиця 2.4

Індивідуальні завдання для лабораторної роботи

№ варіанту	Коефіцієнт k	$U_m, \text{ В}$	$I_{\text{випр.мах}}, \text{ А}$	№ варіанту	Коефіцієнт k	$U_m, \text{ В}$	$I_{\text{випр.мах}}, \text{ А}$
1	0,5	200	1	14	0,6	260	1,2
2	0,6	200	1,1	15	0,7	260	1,3
3	0,7	200	1,2	16	0,8	260	1,4
4	0,8	200	1,3	17	0,7	280	1,5
5	0,5	220	1,4	18	0,6	280	1,6
6	0,6	220	1,5	19	0,7	280	1,7
7	0,7	220	1,6	20	0,8	280	1,8
8	0,8	220	1,7	21	0,8	300	1,9
9	0,5	240	1,8	22	0,6	300	2
10	0,6	240	1,9	23	0,7	300	1
11	0,7	240	2	24	0,8	300	1,1
12	0,8	240	1	25	0,8	320	1,2
13	0,7	260	1,1				

Змодельуйте схему (рис. 2.5) з попередньо розрахованими значеннями опорів резисторів в середовищі Multisim та переконайтеся в тому, що при шунтуванні діодів резисторами напруги розподіляються рівномірно. Видаливши один з резисторів, переконайтеся в нерівномірному розподілі напруг.

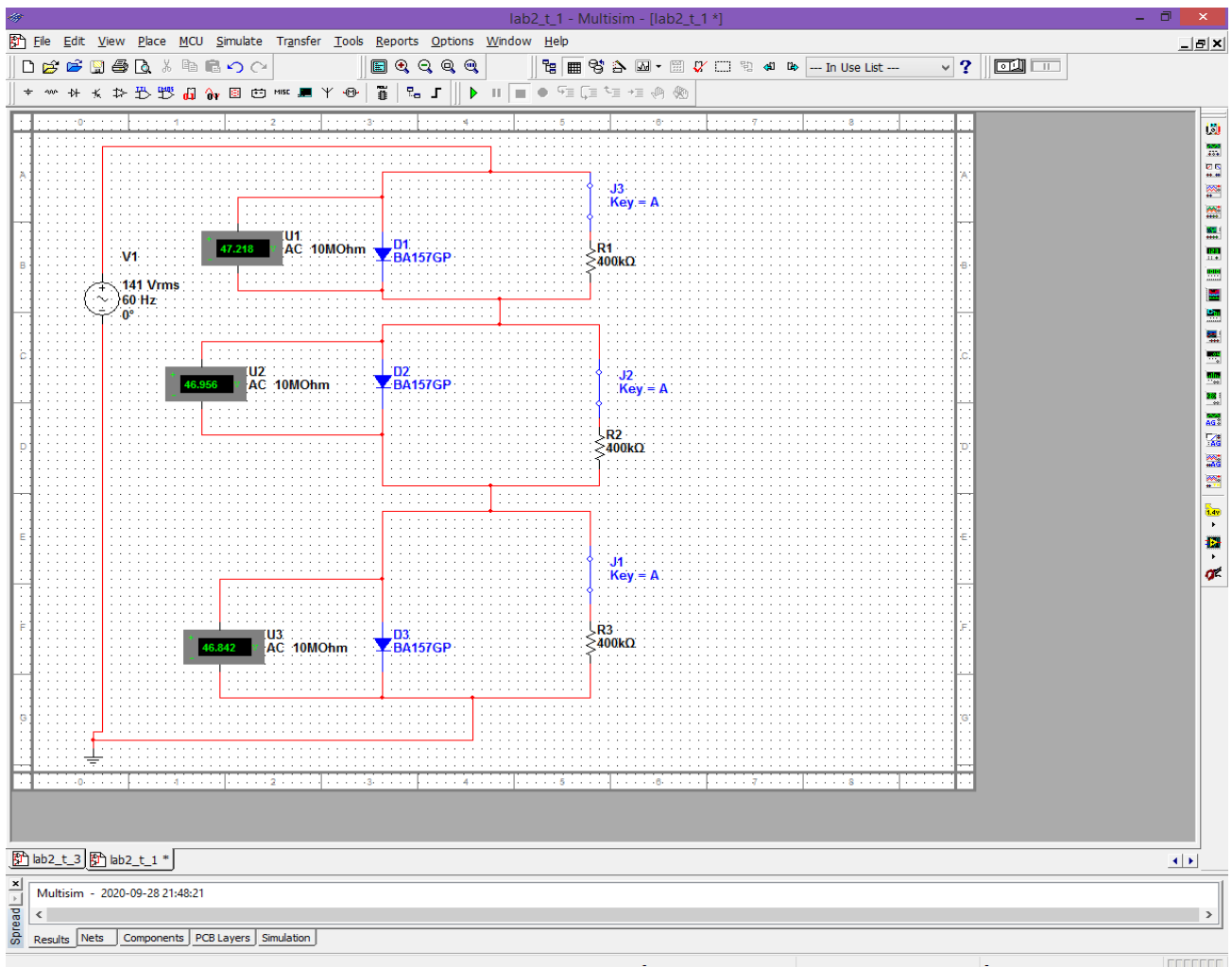


Рис. 2.5. Схема послідовного з'єднання діодів у середовищі Multisim

3. Дослідження паралельно з'єднаних діодів

Розрахуйте схему випрямляючого електричного кола, що дозволяє отримати випрямлений струм, значення якого вказано в табл. 2.4, використовуючи діоди BA157GP ($I_{np.max} = 1A$ та $U_{np} = 1,3B$).

Змодельуйте схему (рис. 2.6) з попередньо розрахованими значеннями опорів резисторів в середовищі Multisim та переконайтеся в тому, що при паралельному з'єднанні діодів з додатковими резисторами струм розподіляється рівномірно. Видаливши один з резисторів, переконайтеся в нерівномірному розподілі струмів.

Зміст звіту

1. Експериментальна схема для отримання ВАХ діода та заповнена таблиця 2.2.
2. Графік ВАХ діода.
3. Заповнена таблиця 2.3.
4. Розрахунок схеми електричного кола для випрямлення синусоїдної напруги з заданими параметрами згідно варіанту, з використанням діодів BA157GP та схема для моделювання процесів в даному колі в середовищі Multisim.
5. Розрахунок параметрів схеми кола, що дозволяє отримати випрямлений струм згідно варіанту, використовуючи діоди BA157GP та схема для моделювання процесів в даному колі в середовищі Multisim.
6. Висновки по роботі.

Література

Л [2] с. 76-78; Л [6] с. 50-51; Л [7]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНО- ТА ДВОХНАПІВПЕРІОДНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

Мета роботи – вивчення особливостей функціонування та проведення порівняльного аналізу процесів в схемах одно- та двохнапівперіодних випрямлячів.

Пристрої та елементи

Джерело змінної напруги, заземлення – розділ **Sources**;

Осцилограф – розділ **Instruments**;

Резистори, ключ, трансформатор, конденсатор – розділ **Basic**;

Діоди – розділ **Diodes**;

Вольтметр – розділ **Indicators**.

Короткі теоретичні відомості

Випрямлячами (рис.3.1) називають пристрої, призначені для перетворення змінної напруги в постійну. Вони використовуються для живлення різноманітних електронних пристроїв, які вирішують завдання управління, регулювання, перетворення і відображення інформації.

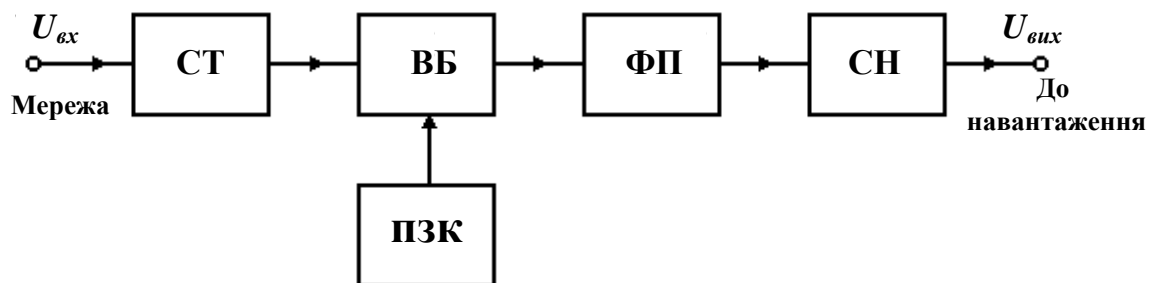


Рис. 3.1. Структурна схема випрямляча

Силовий трансформатор **СТ** забезпечує гальванічну ізоляцію навантаження від силової мережі та перетворює (підвищує або знижує) первинну мережеву напругу $U_{\text{вх}}$ з метою отримання необхідної величини постійної напруги на виході. Вентильний блок **ВБ** є основною частиною випрямляча, забезпечуючи однонаправлене протікання струму в навантаженні. В якості вентилів найбільш часто використовуються напівпровідникові пристрої з односторонньою провідністю: діоди (найчастіше), тиристори, транзистори тощо. Ідеальні вентильні елементи повинні пропускати струм тільки в прямому напрямку і зовсім не пропускати його в зворотному напрямку. Реальні вентильні елементи пропускають певний струм в зворотному напрямку і мають падіння напруги при протіканні прямого струму, що знижує ККД, як вентильного блоку, так випрямляча в цілому.

Фільтруючий пристрій **ФП** використовується для послаблення пульсацій випрямленої напруги. В якості фільтруючого пристрою зазвичай використовують реактивні елементи (індуктивний, ємнісний або змішаний – Г- та П-подібний фільтри) або активні елементи – транзистори, операційні підсилювачі тощо.

Стабілізатор напруги **СН** призначений для зменшення впливу зовнішніх факторів (зміни напруги мережі, температури навколишнього середовища, навантаження та ін.) на вихідну напругу випрямляча. Якщо до стабільності вихідної напруги не висувається особливих вимог, то стабілізатор може бути відсутній. До складу випрямляча можуть також входити різні допоміжні блоки, призначені для підвищення його надійності, наприклад пристрій захисту і контролю **ПЗК**.

Класифікують випрямлячі за наступними ознаками:

- за кількістю випрямлених напівхвиль напруги (однонапівперіодні та двохнапівперіодні);
- за числом фаз силової мережі (однофазні, двохфазні, трьохфазні тощо);
- за схемою вентильного блоку (випрямлячі з паралельним, послідовним та мостовим ввімкненням однофазних випрямлячів);
- за типом згладжуючого фільтра;

- за наявності трансформатора та ін.

Однофазний однонапівперіодний випрямляч (рис. 3.2) є найпростішим. Його роботу пояснюють часові діаграми, наведені на рис. 3.3. Під дією змінної напруги вторинної обмотки трансформатора $u_2(t) = U_{2m} \sin \omega t$ в періоди часу $t \in (0; T/2)$ напівпровідниковий діод зміщений в прямому напрямку і проводить струм. При цьому напруга і струм в навантаженні повторюють форму вхідного сигналу. В моменти часу $t \in (T/2; T)$ діод зміщений в зворотному напрямку, він не проводить струм і, відповідно, струм і напруга в навантаженні дорівнюють нулю.

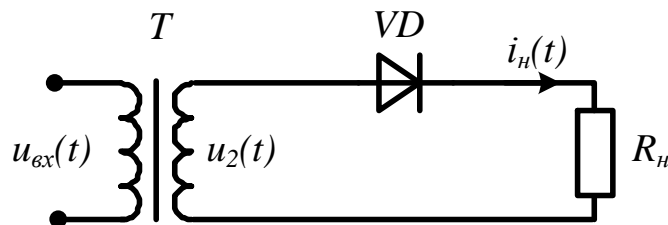


Рис. 3.2. Схема однофазного однонапівперіодного випрямляча

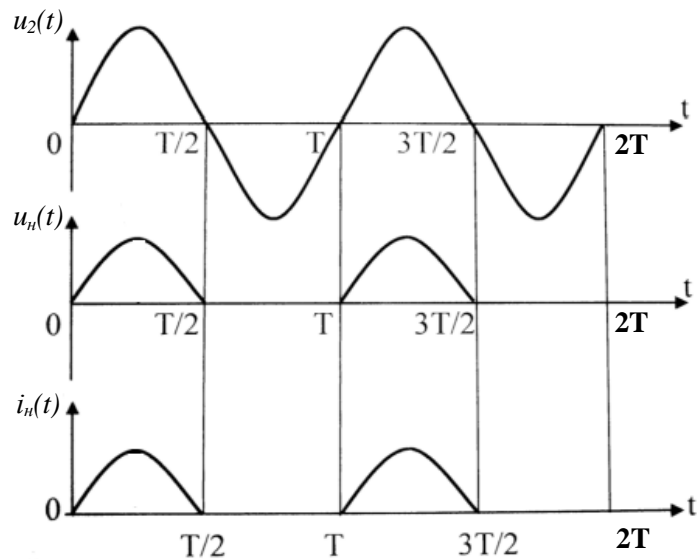


Рис. 3.3. Принцип роботи випрямляча

Середнє значення напруги (постійна складова) на навантажувальному резисторі дорівнює

$$U_{\text{сеп}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_n(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = -\frac{U_{2m}}{\omega T} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} \approx \frac{U_{2m}}{\pi} \approx \frac{\sqrt{2} U_{2\partial}}{\pi}.$$

Аналогічно, середній струм в навантаженні

$$I_{\text{сеп}} \approx \frac{I_{\text{нм}}}{\pi} \approx \frac{\sqrt{2} I_{\text{нд}}}{\pi}.$$

При проектуванні однонапівперіодних випрямлячів важливо правильно обрати тип діода, що задовільно працював би в такій схемі. Цей вибір проводять на основі двох міркувань. По-перше, припустимий струм діода повинен перевищувати амплітудне значення струму $I_{\text{н.м}} = \frac{U_{2m}}{R_n}$. По-друге, діод повинен мати певну електричну міцність. Останнє пов'язане з тим, що протягом тих півперіодів, коли діод закритий, до нього прикладена напруга, рівна напрузі на вторинній обмотці трансформатора, що має зворотну для діода полярність («мінус» на аноді). Максимальна величина цієї напруги $U_{\text{звор.мах}}$ у даному випадку дорівнює амплітуді напруги на вторинній обмотці трансформатора $U_{\text{звор.мах}} = U_{2m} = \pi U_{\text{сеп}}$, тобто більш ніж в три рази перевищує середню випрямлену напругу. Це потрібно враховувати на етапі вибору діода для випрямляча.

Важливим параметром, що характеризує ефективність роботи випрямляча, є коефіцієнт пульсації $K_{\text{П}}$. Він показує відхилення випрямленої напруги на виході випрямляча від постійної. В однонапівперіодній схемі випрямляча без фільтра $K_{\text{П}} = 1,57$.

До недоліків однонапівперіодного випрямляча слід віднести велику пульсацію випрямленої напруги, невелике значення постійної складової, велику зворотну напругу та неефективне використання силового трансформатора, через який подається змінна напруга.

Очевидно, що параметри випрямляча можна поліпшити, якщо забезпечити протікання струму навантаження в обидва напівперіоди вхідної напруги. Для цього використовують два однонапівперіодних випрямляча, з'єднані паралельно (рис. 3.4). Напруга на них подається від двох однакових половин вторинної обмотки w_2 та w_2' (створюються дві протифазні напруги).

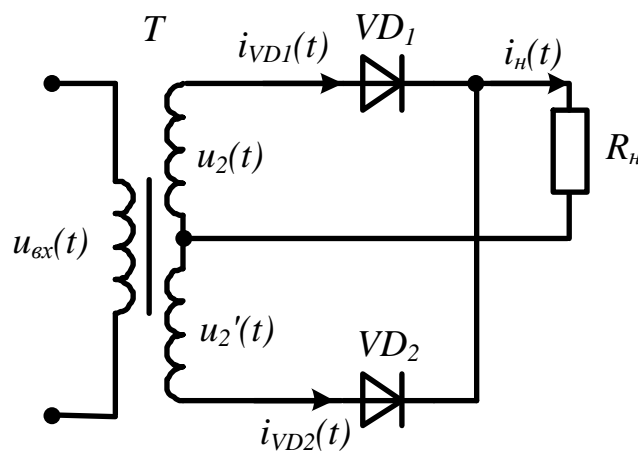


Рис. 3.4. Схема двохнапівперіодного випрямляча з середньою точкою

Розглянемо часові діаграми роботи даної схеми (рис. 3.5). Під дією змінної напруги вторинної обмотки трансформатора $u_2(t) = U_{2m} \sin \omega t$ в періоди часу $t \in (0; T/2)$ напівпровідниковий діод VD_1 зміщений в прямому напрямку і проводить струм. Діод VD_2 при цьому зміщений в зворотному напрямку і тому струм в навантаженні визначається тільки напругою $u_2(t)$. В моменти часу $t \in (T/2; T)$ діод VD_1 зміщений в зворотному напрямку, а струм навантаження протікає через VD_2 і визначається напругою $u_2'(t) = U_{2m} \sin(\omega t + \pi)$. Т.ч., в навантаженні спостерігається два напівперіоди пульсуючої напруги, частота пульсацій в два рази вище частоти вхідної напруги.

Середні значення напруги і струму в навантажувальному резисторі у випадку двохнапівперіодного випрямлення будуть вдвічі більше аналогічних показників для однонапівперіодної схеми:

$$U_{\text{нсер}} \approx \frac{2U_{2m}}{\pi} \approx \frac{2\sqrt{2}U_{2\partial}}{\pi}; \quad I_{\text{нсер}} \approx \frac{2I_{\text{нм}}}{\pi} \approx \frac{2\sqrt{2}I_{\text{н\partial}}}{\pi}.$$

Максимальне значення зворотної напруги на діоді досягає подвоєного амплітудного значення напруги вторинної обмотки трансформатора $U_{\text{звор. max}} = 2U_{2m} = \pi U_{\text{нсер}}$.

Коефіцієнт пульсації напруги на виході двохнапівперіодного випрямляча без фільтра $K_{\text{II}} = 0,67$.

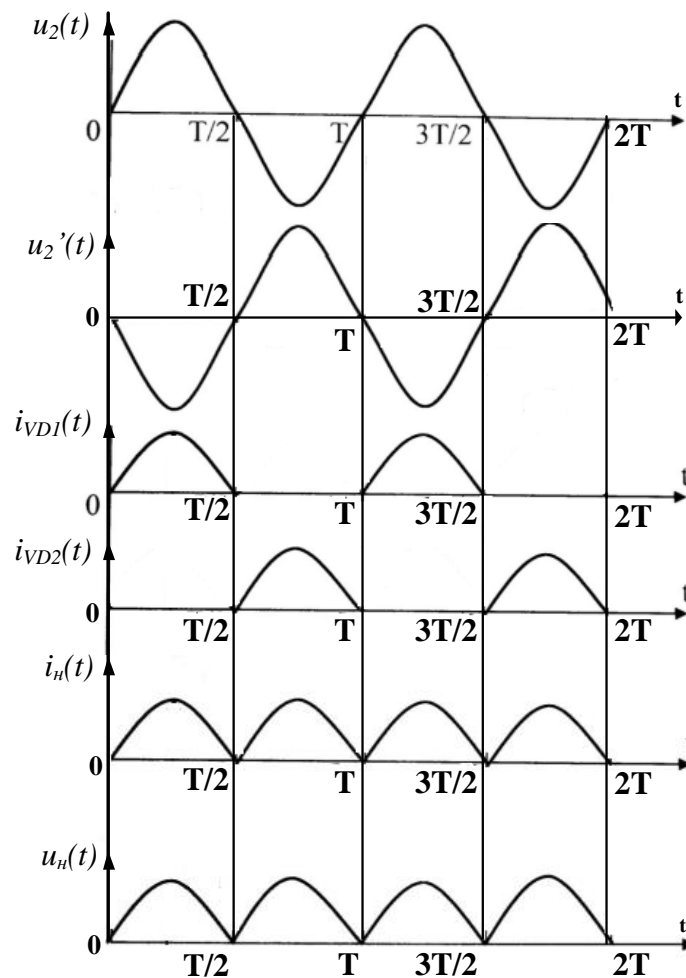


Рис. 3.5. Принцип роботи двохнапівперіодного випрямляча

Частота випрямленого сигналу f для схем з одно- або двохнапівперіодним випрямленням обернено пропорційна його періоду $f = 1/T$. При цьому період сигналу на виході однонапівперіодного випрямляча в два рази більше, ніж у випадку двохнапівперіодного.

Розглянуті схеми випрямлячів мають досить великі значення коефіцієнта пульсацій. Для зниження рівня пульсацій на виході випрямляча використовують спеціальні пристрої – згладжуючі фільтри. Найпростішим є ємнісний фільтр, що являє собою конденсатор, ввімкнений паралельно до навантаження. Розглянемо його роботу на прикладі однонапівперіодного випрямляча (рис. 3.6).

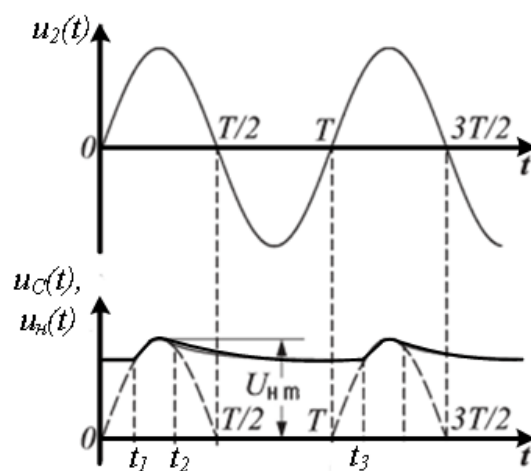


Рис. 3.6. Принцип роботи однонапівперіодного випрямляча з фільтром

Коли напруга на діоді додатна (вона дорівнює різниці напруги на вторинній обмотці трансформатора $u_2(t)$ і напруги на конденсаторі $u_C(t)$), діод відкритий і конденсатор заряджається до амплітудного значення напруги U_{2m} . Цьому режиму відповідає інтервал часу $t_1 - t_2$.

Протягом інтервалу часу $t_2 - t_3$ напруга $u_C > u_2$, діод закритий, а конденсатор розряджається через навантажувальний резистор R_n з постійною часу $\tau_{роз} = CR_n$. При цьому напруга $u_n(t)$ знижується до деякого найменшого значення.

Починаючи з моменту часу t_3 , напруга $u_C(t)$ на конденсаторі стає менше напруги $u_2(t)$. Діод відкривається, конденсатор починає заряджатися, і процеси повторюються. Як показують часові діаграми, при ввімкненні ємнісного фільтра

напруга $u_n(t)$ не зменшується до нуля, а пульсує в деяких межах, збільшуючи середнє значення випрямленої напруги.

Зазвичай, ємність конденсатора фільтра обирають такою, щоб його реактивний опір був набагато менше опору резистора навантаження

$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \ll R_n$. В цьому випадку пульсації напруги на навантаженні малі і

припустимо вважати, що ця напруга постійна.

Середнє значення напруги в навантажувальному резисторі випрямляча з ємнісним фільтром може бути приблизно обчислене за допомогою формули

$$U_{n\text{сер}} = \frac{(U_{n\text{max}} + U_{n\text{min}})}{2} = U_{n\text{max}} - \frac{\Delta U_n}{2};$$

де $U_{n\text{max}}$ та $U_{n\text{min}}$ – максимум і мінімум вихідної напруги;

$$\Delta U_n = U_{n\text{max}} - U_{n\text{min}}.$$

При цьому коефіцієнт пульсації вихідної напруги дорівнює

$$K_{\Pi} = \frac{\Delta U_n}{U_{n\text{сер}}}.$$

Контрольні питання

1. На чому базується принцип дії випрямних діодів?
2. Що називають випрямлячем?
3. Замалюйте схему найпростішого випрямляча.
4. В чому полягає принцип роботи однонапівперіодного випрямляча?
5. В чому полягає принцип роботи двохнапівперіодного випрямляча?
6. Для чого в схемах випрямлячів застосовують фільтри?

7. З яких міркувань слід обирати ємність конденсатора для фільтра в схемі випрямляча?

Підготовка до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити теоретичні відомості і дати відповіді на контрольні запитання.
2. Ознайомитись з основними параметрами та характеристиками діода, який зазначений для Вашого варіанту у таблиці 3.1 та занести їх у протокол.

Порядок виконання роботи

*Зверніть увагу: осцилограф та вольтметри під час виконання роботи повинні бути налаштовані в режимі **DC**.*

1. Дослідження однонапівперіодного випрямляча без фільтра

1.1. Складіть схему, зображену на рис. 3.7. Для цього необхідно використати напівпровідниковий діод згідно свого варіанта (табл. 3.1). На вхід «Channel A» осцилографа подається вхідний сигнал, а на вхід «Channel D» – вихідний. Ключ в розімкненому положенні.

Таблиця 3.1

Індивідуальні завдання для лабораторної роботи

Номер варіанту	Назва діоду	Номер варіанту	Назва діоду
1-3	1N4001	16-18	1N4933
4-6	BA157GP	19-21	1N4937
7-9	BYV10-40	22-24	1N5400
10-12	BYV27-100	25	1N5406
13-15	BYV28-200		

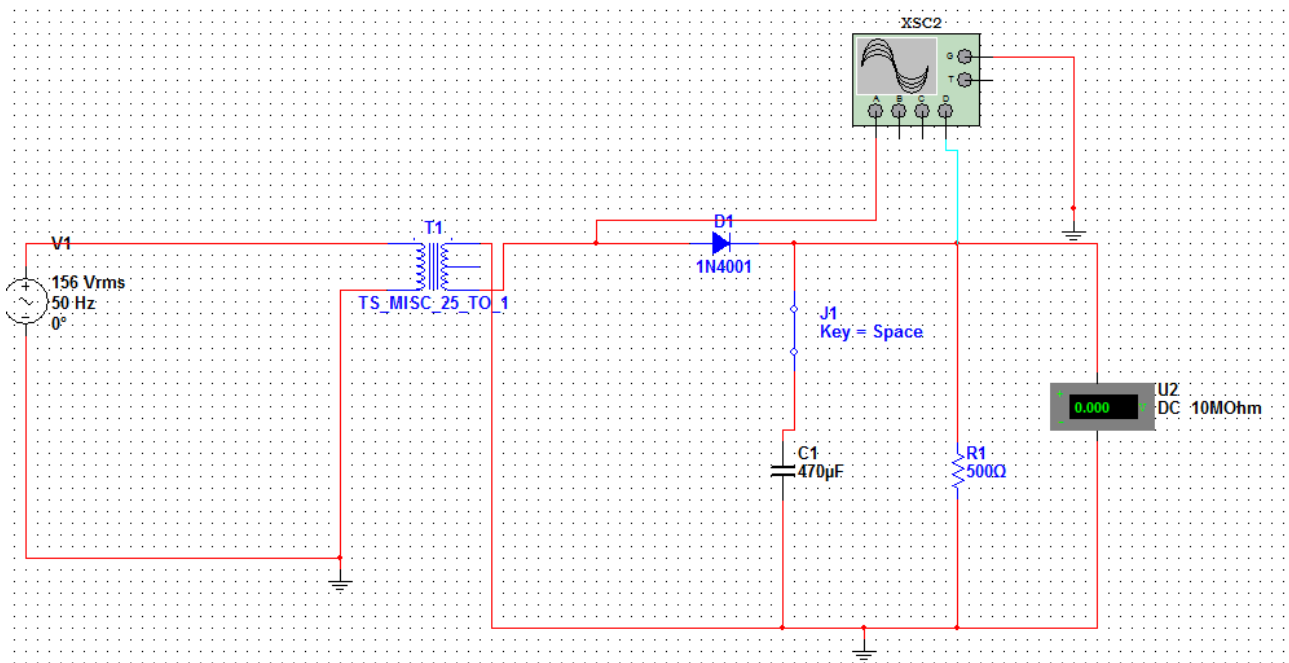


Рис. 3.7. Схема для дослідження однонапівперіодного випрямляча в середовищі Multisim

- 1.2. Замалюйте осцилограми напруг випрямляча. За осцилограмами виміряйте і запишіть до табл. 3.2 амплітудні значення вхідної та вихідної напруг випрямляча, а також період T випрямленої напруги. Обчисліть і занесіть до табл. 3.2 частоту f вихідного сигналу (додаток Д.1).
- 1.3. Обчисліть середнє значення (постійну складову) випрямленої напруги на навантажувальному резисторі $U_{\text{серед}}$. Запишіть отримані значення до табл. 3.2 (додаток Д.1).
- 1.4. Розрахуйте і запишіть до табл. 3.2 максимальну зворотну напругу на діоді $U_{\text{звор. max}}$ та амплітудне значення струму $I_{\text{нт}}$ (додаток Д.1). Порівняйте отримані значення з відповідними характеристиками діода (взятими з довідника), що використовується в схемі випрямляча.

Тип випрямляча	Вимірювання			Розрахунок			
	$U_{т\ вх}$ В	$U_{т\ вих}$ В	T , мс	$U_{н\ сер}$ В	f , Гц	$U_{звор\ max}$ В	$I_{н\ сер}$ мА
Однонапівперіодний без фільтра							
Двохнапівперіодний без фільтра							

2. Дослідження однонапівперіодного випрямляча з фільтром

2.1. В схемі (рис. 3.7) переведіть ключ у замкнене положення.

2.2. Замалюйте осцилограми напруг випрямляча. За осцилограмами виміряйте і запишіть до табл. 3.3 максимальне $U_{н\ max}$ і мінімальне $U_{н\ min}$ значення вихідної напруги. Розрахуйте різницю між максимумом і мінімумом вихідної напруги $\Delta U_{н}$. За отриманими даними обчисліть середнє значення випрямленої напруги $U_{н\ сер}$ (додаток Д.1). Результати розрахунків занесіть до табл. 3.3.

2.3. Виміряйте за допомогою вольтметра і запишіть до табл. 3.3 значення випрямленої напруги.

2.4. Розрахуйте коефіцієнт пульсації K_L вихідного сигналу. Результат запишіть до табл. 3.3 (додаток Д.1).

2.5. Дослідіть залежність коефіцієнта пульсації від ємності фільтра. Для цього встановіть в діалоговому вікні значення ємності 100 мкФ. Виконайте завдання пп. 2.2-2.4.

2.6. Дослідіть залежність коефіцієнта пульсації від величини струму навантаження. Для цього в схемі, представленій на рис. 3.7 із замкненим ключем встановіть значення ємності фільтра 470 мкФ та значення опору навантажувального резистора 500 Ом. Виконайте завдання пп. 2.2-2.4.

Тип випрямляча	Параметри елементів	Вимірювання			Розрахунок		
		$U_{n\ max}$ В	$U_{n\ min}$ В	$U_{n\ сер}$ В	ΔU_n В	$U_{n\ сер}$ В	$K_{П}$
Однонапівперіодний з фільтром	$C=470\ \mu\text{Ф}$ $R=200\ \text{Ом}$						
	$C=100\ \mu\text{Ф}$ $R=200\ \text{Ом}$						
	$C=470\ \mu\text{Ф}$ $R=500\ \text{Ом}$						
Двохнапівперіодний з фільтром	$C=470\ \mu\text{Ф}$ $R=200\ \text{Ом}$						

3. Дослідження двохнапівперіодного випрямляча без фільтра

3.1. Складіть схему, зображену на рис. 3.8. На вхід «Channel A» осцилографа подається вхідний сигнал, а на вхід «Channel D» – вихідний. Ключ в розімкненому положенні.

3.2. Виконайте завдання пп. 1.2-1.4.

Зверніть увагу, що в даному випадку амплітудне значення струму через діод розраховується за формулою $I_{н.т} = \frac{2U_{2m}}{R_n}$.

4. Дослідження двохнапівперіодного випрямляча з фільтром

4.1. В схемі (рис. 3.8) переведіть ключ у замкнене положення.

4.2. Виконайте завдання пп. 2.2-2.4.

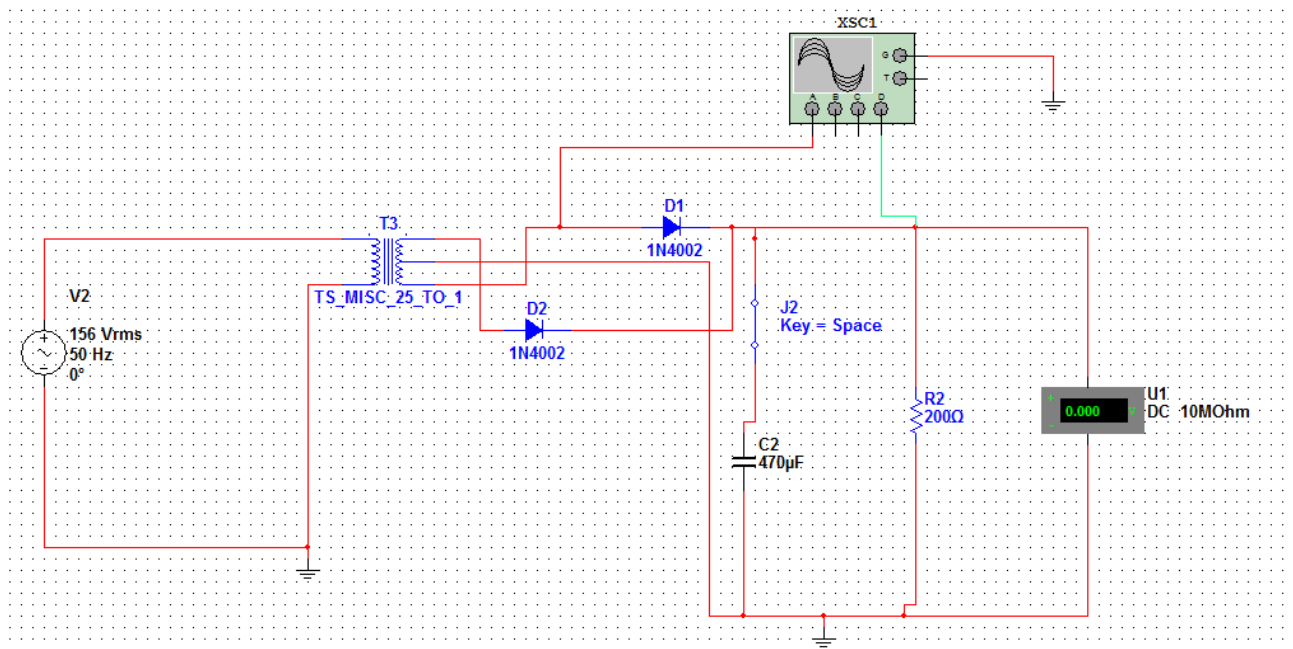


Рис. 3.8. Схема для дослідження двохнапівперіодного випрямляча в середовищі Multisim

Зміст звіту

1. Характеристики діоду згідно номеру варіанту.
2. Експериментальна схема (у середовищі Multisim) для дослідження однонапівперіодного випрямляча.
3. Осцилограми напруг випрямляча для випадку однонапівперіодного випрямлення без фільтра та з фільтром.
4. Заповнена таблиця 3.2.
5. Експериментальна схема (у середовищі Multisim) для дослідження двохнапівперіодного випрямляча.
6. Осцилограми напруг випрямляча для випадку двохнапівперіодного випрямлення без фільтра та з фільтром.
7. Заповнена таблиця 3.3.
8. Висновки по роботі.

Література

Л [1] с. 60-68; Л [2] с. 357-365; Л [6] с. 44-50; Л [7]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

Мета роботи: вивчити основні властивості та параметри стабілітронів, виміряти їх вольт-амперні характеристики, провести дослідження електричних процесів в схемі найпростішого стабілізатора напруги.

Пристрої та елементи

Джерело постійної напруги, заземлення – розділ **Sources**;

Резистори, ключ – розділ **Basic**;

Діоди – розділ **Diodes**;

Вольтметр, амперметр – розділ **Indicators**.

Короткі теоретичні відомості

Стабілітрон – це напівпровідниковий діод, який працює в режимі електричного пробою. Принцип роботи стабілітрона ґрунтується на тому, що зворотна напруга на $p-n$ -переході в режимі електричного пробою майже не змінюється при значних змінах струму (рис. 4.1, а). Стабілітрони призначені для роботи у схемах стабілізації напруги джерел живлення, обмежувачах постійної та імпульсної напруги, в схемах захисту різних елементів і пристроїв від неприпустимого збільшення напруги на них. Крім основного призначення стабілітрони знаходять широке застосування для обмеження постійної та імпульсної напруги, в якості елементів міжкаскадного зв'язку в електронних схемах, як керовані ємності, шумові генератори і т.д.

Пробосм $p-n$ -переходу називається явище різкого збільшення зворотного струму діода при досягненні зворотною напругою деякого критичного значення.

Розрізняють наступні види пробою: електричний (тунельний і лавинний) та тепловий.

Тунельний та лавинний пробої обумовлені фізичними процесами, що відбуваються в p - n -переході в сильних електричних полях, а тепловий – процесами, обумовленими нагріванням p - n -переходу при протіканні через нього зворотного струму.

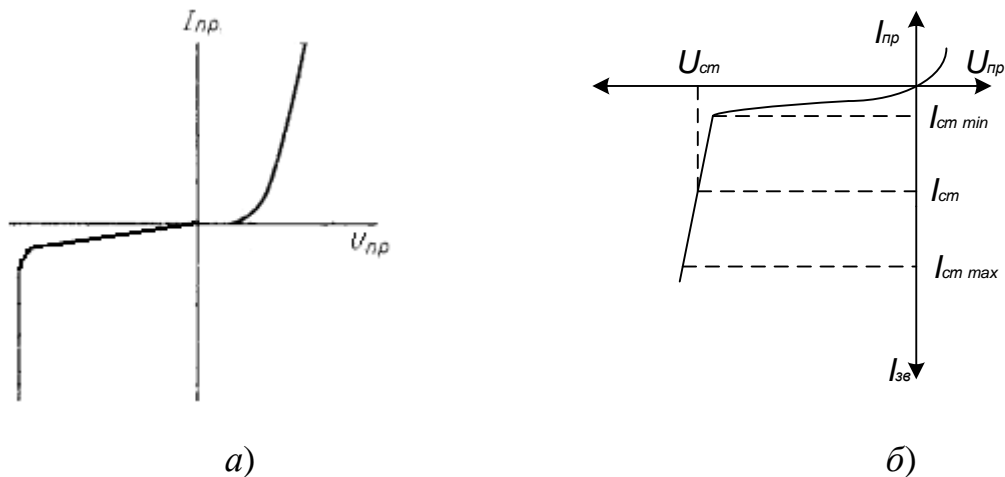


Рис. 4.1. ВАХ (а) і робоча область ВАХ (б) кремнієвого стабілітрона

Електричний пробій є оборотним і робота напівпровідникових приладів у режимі електричного пробою допускається. Тепловий пробій є необоротним, тобто напівпровідниковий прилад після теплового пробою виходить з ладу.

В якості матеріалу для напівпровідникових стабілітронів використовується кремній, тому що він має більш високу температурну стабільність порівняно з германієм.

На рис. 4.1, б наведена робоча ділянка ВАХ стабілітрона. Оскільки реальна ВАХ в області пробою має деякий нахил, то напруга стабілізації залежить від струму стабілізації $I_{см}$. Максимальний струм стабілізації $I_{см max}$ обмежений припустимою потужністю розсіювання P_{max} і можливістю переходу електричного пробою в тепловий, який є необоротним. Мінімальний струм стабілізації $I_{см min}$ відповідає початку стійкого електричного пробою. При менших струмах в діоді виникають значні шуми, походження яких пов'язане з механізмом лавинного пробою (шуми в передпробійній області використовуються в спеціальних приладах – напівпровідникових генераторах шуму). Диференціальний опір $r_{диф}$

характеризує якість стабілізації і визначається кутом нахилу ВАХ в області пробою (він зростає із зростанням напруги стабілізації).

Схема найпростішого стабілізатора напруги наведена на рис. 4.2. Стабілітрон з'єднують паралельно з навантаженням R_H , а в загальне коло вмикають обмежуючий резистор $R_{обм}$, на якому виділяється надмірне падіння напруги.

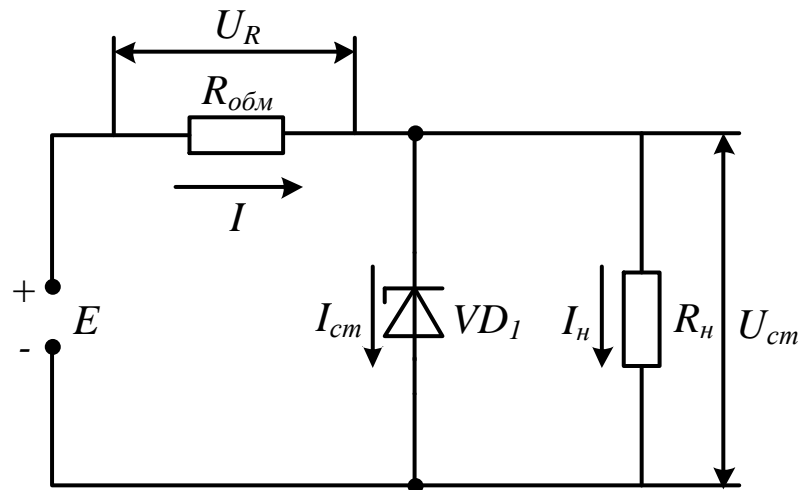


Рис. 4.2. Схема стабілізатора напруги

Для схеми, наведеної на рис. 4.2, справедливе рівняння:

$$I_{ст} = \frac{E}{R_{обм}} - \frac{R_{обм} + R_H}{R_{обм} R_H} U_{ст}.$$

З фізичної точки зору принцип стабілізації напруги в даній схемі пояснюється наступним чином. Збільшення напруги джерела живлення на величину ΔE призводить до збільшення загального струму в колі $I = I_{ст} + I_H$. Оскільки при зміні струму, що проходить через стабілітрон, напруга на ньому залишається практично незмінною і рівною напрузі стабілізації, то зміною струму навантаження I_H можна знехтувати. Збільшення напруги джерела живлення на величину ΔE майже цілком відбудеться на обмежувальному резисторі $R_{обм}$. При зменшенні напруги джерела живлення на величину ΔE загальний струм в колі зменшується, що призводить до зменшення струму, що проходить через

стабілітрон. Якщо це зменшення не вийшло за межі стабілізації, то в цьому випадку при збереженні постійної напруги на навантаженні напруга на резисторі $R_{обм}$ зменшиться на величину ΔE . Таким чином, наявність обмежувального резистора $R_{обм}$ в розглянутій найпростішій схемі стабілізатора напруги є принципово необхідною.

Зміна опору навантаження при незмінній напрузі джерела живлення не призведе до зміни напруги на обмежувальному резисторі R , а викличе зміну струму, що проходить через стабілітрон.

Основними параметрами, які характеризують випрямні діоди, є:

– **Напруга стабілізації** – номінальне значення напруги на стабілітроні при заданому зворотному струмі стабілітрона в області пробою. Напруга стабілізації приблизно дорівнює напрузі пробою. У стабілітронах напругою стабілізації до 7 В використовується тунельний пробій, а з напругою стабілізації більше 15 В – лавинний пробій.

Насьогодні розроблені стабілітрони на стабілізування напруги від одиниць до сотень вольт.

– **Диференційний динамічний опір стабілітрона** – r_{cm}

$$r_{cm} = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}}$$

Величина диференційного опору залежить від напруги стабілізації. Мінімальне значення спостерігається у діодів з напругою стабілізації 7...10 В. Це пояснюється тим, що в цій області діють обидва механізми пробою. При переході в область лавинного пробою, тобто при збільшенні, і в область тунельного пробою, тобто при зменшенні, диференційний опір різко зменшується. Чим менше r_{cm} , тим вище ступінь стабілізації напруги.

– **Опір постійному струму** $R_{cm} = \frac{U_{cm}}{I_{cm}}$ характеризує втрати в діоді у даній робочій точці.

– **Критерій (коефіцієнт) якості стабілітрона Q** – відношення статичного опору до диференційного при даному струмі стабілізації:

$$Q = \frac{R_{cm}}{r_{cm}} = \frac{dI_{cm}}{dU_{cm}} \frac{U_{cm}}{I_{cm}}.$$

Критерій якості на відміну від диференційного опору характеризує не просто нахил ВАХ, а і його відношення до величини напруги стабілізації.

Оскільки максимальним змінам струму повинні відповідати мінімальні зміни напруги, то величина Q повинна бути якомога більша. Для сучасних стабілітронів Q лежить у межах 20...100.

– **Температурний коефіцієнт напруги стабілізації (ТКН)** – показує зміну напруги стабілізації від температури.

$$\alpha = \frac{1}{U_{cm}} \frac{dU_{cm}}{dT} \cdot 100\%.$$

Залежно від виду пробою стабілітрона ТКН може бути позитивним або негативним. Для зменшення ТКН використовується послідовне увімкнення двох або декількох стабілітронів з ТКН різного знаку.

– **Мінімальний ($I_{cm\min}$) і максимальний ($I_{cm\max}$) струми стабілізації.** Мінімальний струм стабілізації обмежується шумами стабілітрону. При малих струмах пробій носить нестійкий характер і ефективна напруга шумів на стабілітроні досягає декількох сотень мікрвольт. З ростом струму пробій переходить у стійкий стан і шуми зменшуються.

Максимальний струм стабілізації обмежується припустимою потужністю розсіювання стабілітрона. У сучасних стабілітронів він становить від десятків міліампер до десятків ампер.

Контрольні питання

1. Що називають напівпровідниковим стабілітроном? Умовне графічне позначення напівпровідникового стабілітрона.
2. Перерахуйте основні параметри стабілітронів.
3. Назвіть області застосування стабілітронів.
4. Замалюйте ВАХ напівпровідникового стабілітрона.
5. Замалюйте найпростішу схему стабілізації напруги.
6. Які існують види пробою p - n -переходу і в чому їх принципова різниця? Які види пробою використовуються в стабілітронах?

Підготовка до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити теоретичні відомості і дати відповіді на контрольні запитання.
2. Ознайомитись з основними параметрами та характеристиками стабілітрону згідно варіанту та занести їх у протокол.

Порядок виконання роботи

1. Дослідження вольт-амперної характеристики стабілітрону

1.1. Пряма вітка ВАХ

Складіть схему, зображену на рис. 4.3, використовуючи стабілітрон (з розділу «Zener» бібліотеки «Diodes») згідно свого варіанта (табл. 4.1).

Індивідуальні завдання для лабораторної роботи

Номер варіанту	Тип стабілітрону	Напруга стабілізації ($U_{ст. min}$), В	Напруга джерела ($U_{вх}$), В
1	1N4728A	3.279	10
2	1N4729A	3.584	10
3	1N4730A	3.891	10
4	1N4731A	4.296	12
5	1N4732A	4.704	12
6	1N4733A	5.111	15
7	1N4734A	5.624	15
8	1N4735A	6.253	18
9	1N4736A	6.844	18
10	1N4737A	7.545	21
11	1N4738A	8.246	24
12	1N4739A	9.149	27
13	1N4740A	10.05	30
14	1N4741A	11.05	30
15	1N4742A	12.05	30
16	1N4743A	13.05	30
17	1N4744A	15.05	30
18	1N4745A	16.05	30
19	1N4746A	18.05	30
20	1N4747A	20.05	60
21	1N4748A	22.06	60
22	1N4749A	24.06	60
23	1N4750A	27.05	60
24	1N4751A	30.06	100
25	1N4752A	33.06	100

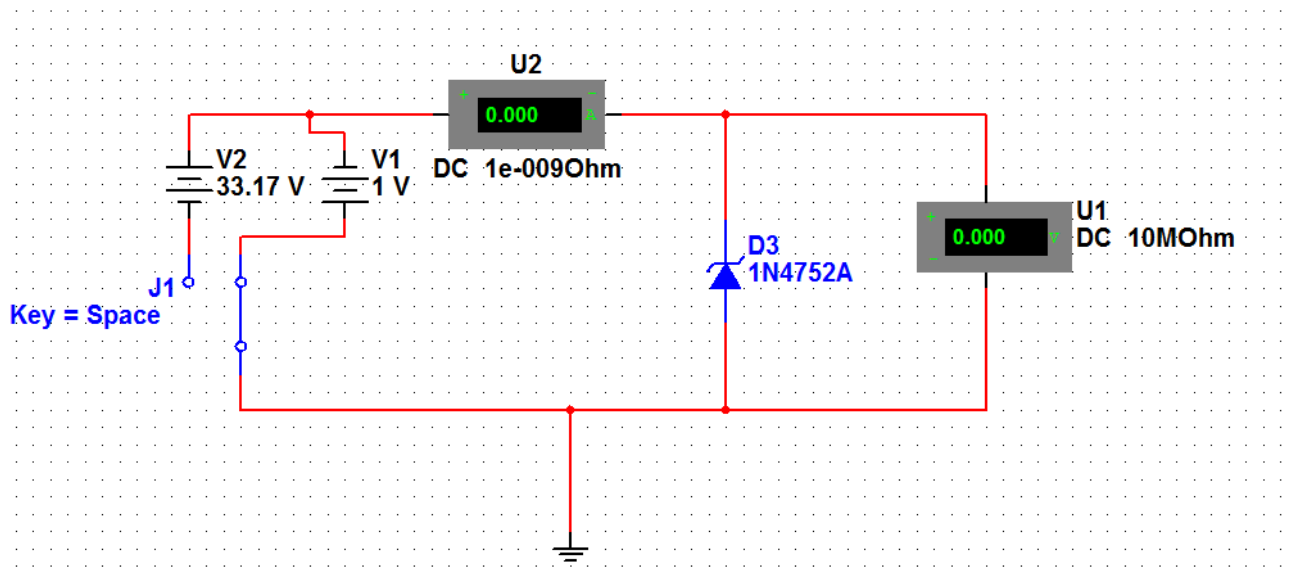


Рис. 4.3. Схема проведення експерименту

У меню Simulate, підменю Analyses активуйте пункт DC Sweep... (рис.4.4).

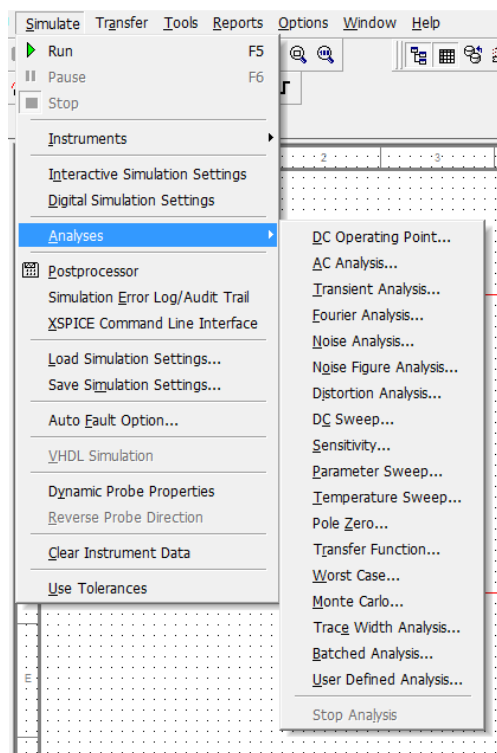


Рис. 4.4. Меню Simulate

Задайте параметри симуляції у вкладці Analysis Parameters, в пункті Source встановіть значення vv1 (джерело напруги №1) та діапазон значень напруги від 0 до 1 В з кроком не менше ніж 0,1 В (рис.4.5).

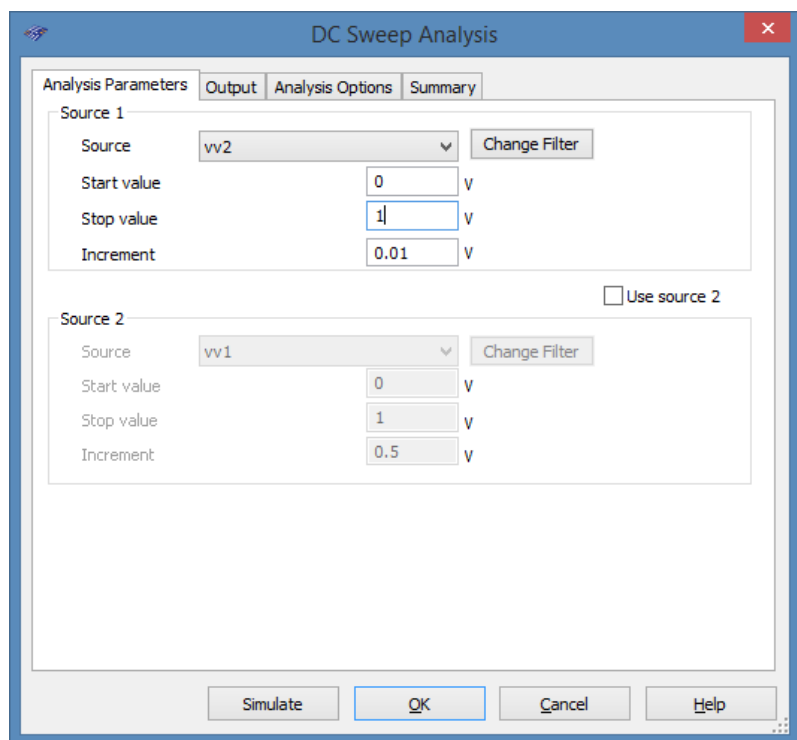
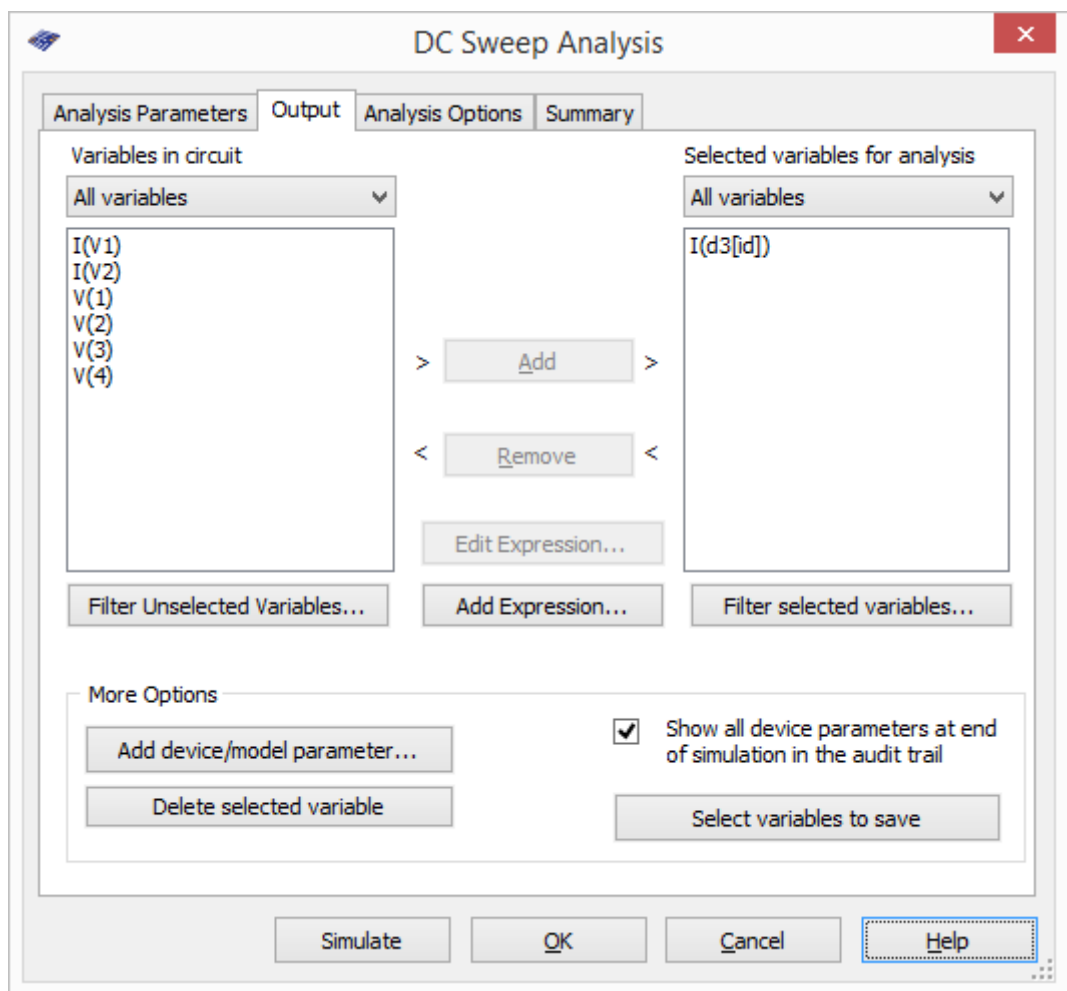
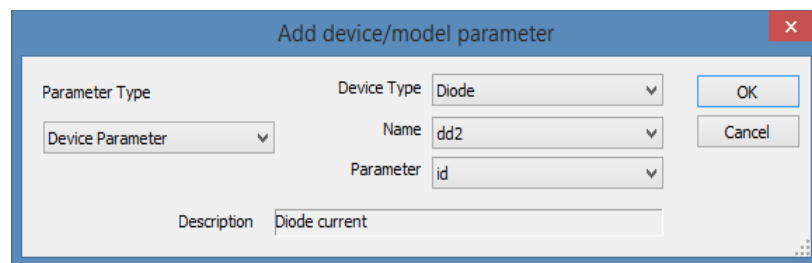


Рис. 4.5 Вкладка Analysis Parameters

У вкладці Output додайте у поле «Selected variables for analysis» параметр «Diode current» для першого та другого діоду (@dd1[id] та @dd2[id], де dd1 – номер діоду у схемі симуляції, [id] – шифр параметру «Diode current») з лівого списку в правий за допомогою кнопки «Add». У випадку їх відсутності потрібно створити дані параметри в ручному режимі: перейти в пункт «Add device/model parameter», обрати у вкладці «Name» необхідний діод, а потім у вкладці «Parameter» встановити параметр «id» (при цьому у полі «Description» має бути вказано «Diode current» (рис. 4.6 а,б).



a



б

Рис.4.6. Вкладка Output

Запустіть симуляцію. На моніторі з'явиться наступне зображення (рис. 4.7):

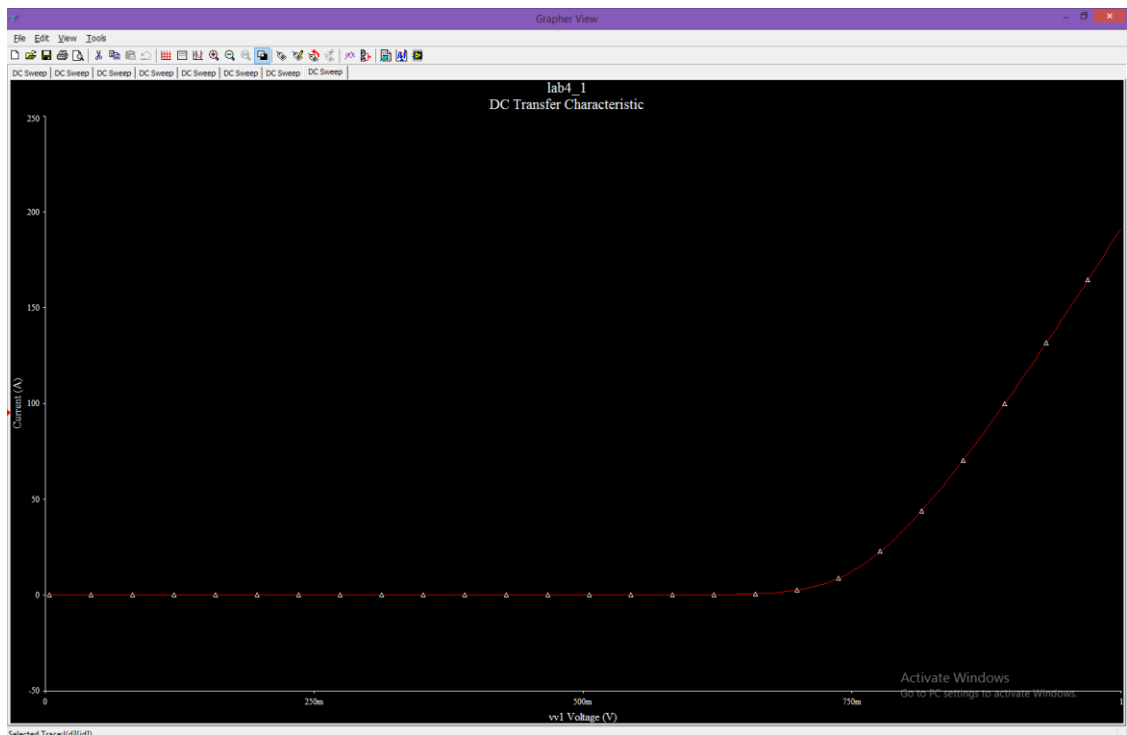


Рис. 4.7 Вигляд прямої вітки ВАХ діодів, побудованої за допомогою Grapher

Для підготовки зображення до збереження, у вікні Grapher необхідно вимкнути реверс кольорів, увімкнути відображення сітки та легенди (рис. 4.8).

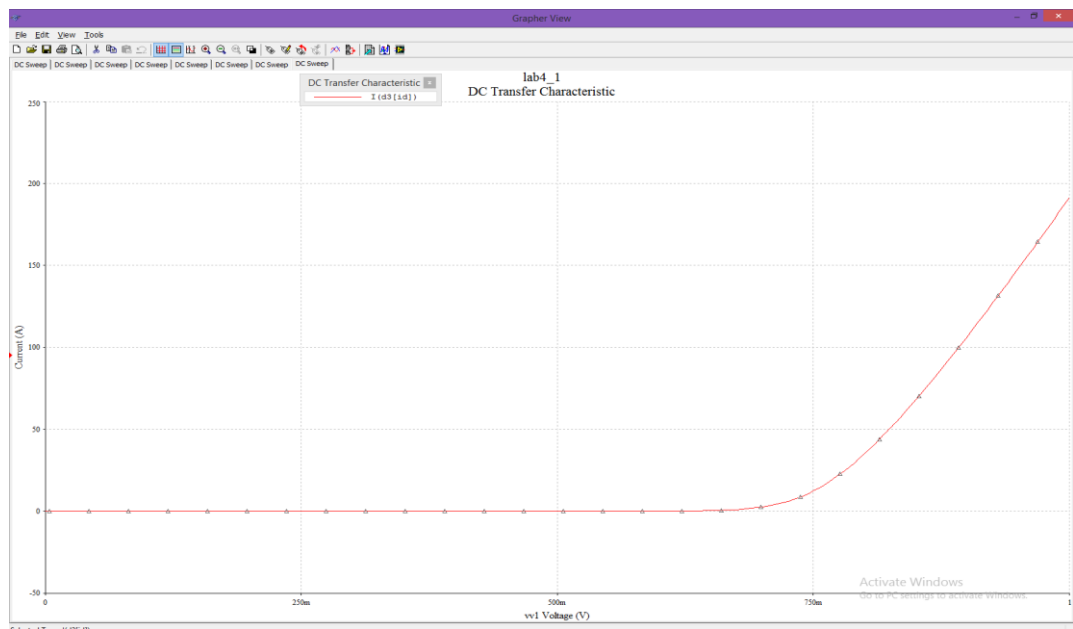


Рис. 4.8. Вид вікна Grapher для прямої вітки ВАХ

Використовуючи отримане зображення за допомогою функції «Show Cursors» рис. 4.9, а заповніть значення в діапазоні 0-1 А з кроком 0,2 В (200 мВ) – див. рис. 4.9, б) в таблиці 4.2.

ЗВЕРНІТЬ УВАГУ!

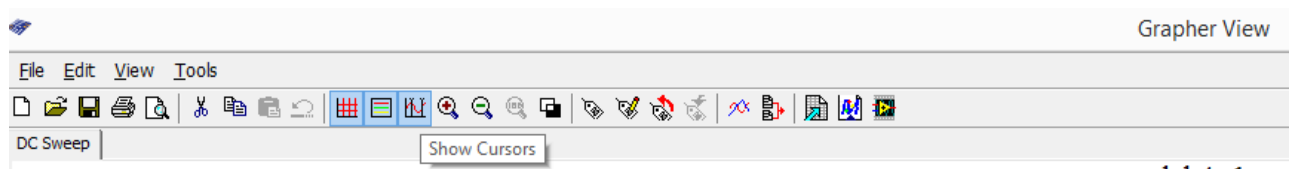
Під час роботи з курсорами необхідно слідкувати за коректністю отриманих даних – у роботі застосовується лише один курсор (перший), тобто у таблиці будуть змінюватись саме параметри X1 та Y1.

Таблиця 4.2

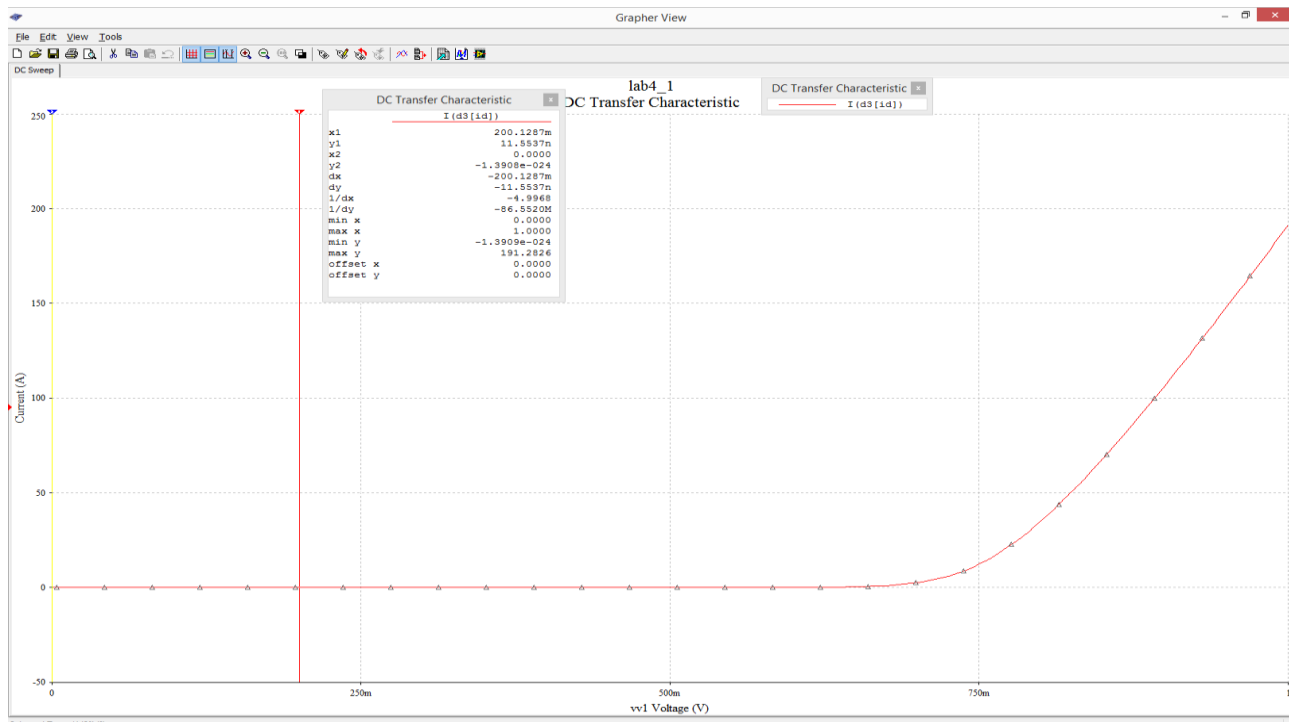
$U_{\text{пр}}, \text{В}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$I_{\text{пр}}, \text{А}$						

Таблиця 4.3

		$U_{\text{ст.мах}}$	U_2	$U'_{\text{РТ}}$	U_1	$U_{\text{ст.мін}}$			
$U_{\text{зв}}, \text{В}$									
$I_{\text{зв}}, \text{А}$									
		$I_{\text{ст.мах}}$	I_2	$I_{\text{РТ}}$	I_1	$I_{\text{ст.мін}}$			



a)



б)

Рис. 4.9. Кнопка активації курсорів (а) та вигляд екрану Grapher з встановленим першим курсором (б)

1.2. Зворотна вітка ВАХ

На схемі моделювання змініть положення ключа, а на вкладці «Analysis Parameters» – vv2 (джерело напруги №2).

Повторіть дії, описані в п. 1.1 для діапазону напруг від 0 до U В, де $U = U_{ст.min} + 0.06 \dots 0.11$. Крок слід обирати, з тих міркувань, щоб він дозволяв максимально зручно працювати у графері (рис.4.10).

Після цього, знаючи $U_{ст.min}$, за допомогою курсорів та засобів масштабування визначте $I_{ст.min}$ (значення струму, що відповідає $U_{ст.min}$) та занесіть його до таблиці 4.3. Приймавши $I_{ст.max}$ рівним $10I_{ст.min}$, визначте по

графіку (рис.4.10) значення $U_{ст.мах}$, що відповідає цьому струму. Занесіть отримані параметри до таблиці 4.4.

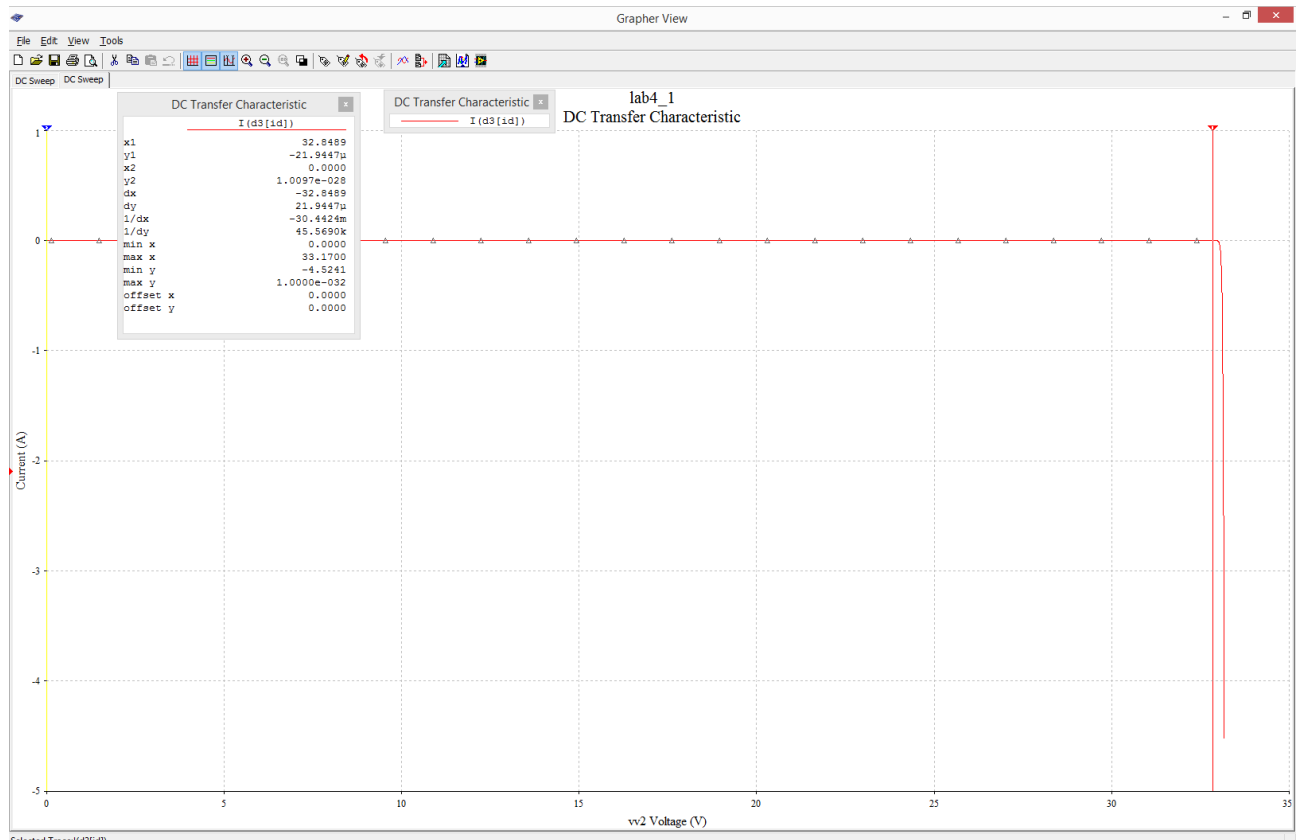


Рис.4.10 Вид вікна Grapher для зворотної вітки ВАХ

Таблиця 4.4

$U_{ст.мін}, B$		U_2, B	
$I_{ст.мін}, A$		U_l, B	
$U_{ст.мах}, B$		$r_{ст}, Ом$	
$I_{ст.мах}, A$		$R_{ст}, Ом$	
U_{PT}, B		Q	
I_{PT}, A		$R_{обм}, Ом$	
I_2, A		$E_{мін}, B$	
I_l, A		$E_{мах}, B$	
	U'_{PT}, B		

Користуючись формулами (4.1) та (4.2), визначте координати робочої точки стабілітрону та занесіть отримані значення до таблиці 4.4.

$$U_{PT} = \frac{U_{ст. max} + U_{ст. min}}{2}; \quad (4.1)$$

$$I_{PT} = \frac{I_{ст. max} + I_{ст. min}}{2}; \quad (4.2)$$

Порівняйте розраховане значення напруги стабілізації з фактичним, тобто за допомогою рис. 4.10 встановіть значення U_{PT} для I_{PT} , та у випадку їх розбіжності занесіть отримане значення U'_{PT} у таблицю 4.4 і у подальших розрахунках використовуйте саме його.

Використовуючи значення I_{PT} , визначте параметри

$$I_2 = I_{PT} + I_{ст. min};$$

$$I_1 = I_{PT} - I_{ст. min}.$$

За допомогою курсорів та засобів масштабування по отриманій кривій на рис. 4.10 визначте напруги U_2 та U_1 , що відповідають струмам I_2 та I_1 (параметри точок 1 та 2).

Користуючись формулами (4.3)-(4.5), визначте значення диференційного опору гст та опору постійному струму $R_{ст}$ в робочій точці, а також коефіцієнт якості Q . Занесіть отримані результати у таблицю 4.4.

$$r_{ст} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}; \quad (4.3)$$

$$R_{ст} = \frac{U_{PT}}{I_{PT}}; \quad (4.4)$$

$$Q = \frac{R_{ст}}{r_{ст}}; \quad (4.5)$$

За допомогою формул (4.6) – (4.8), визначте значення обмежуючого опору $R_{обм}$ та напруг стабілізації E_{max} та E_{min} . Отримані результати занесіть у таблицю 4.4.

$$R_{обм} = \frac{U_{вх} - U_{PT}}{I_{PT}}; \quad (4.6)$$

Стабілізація забезпечується для напруг:

$$E_{min} = U_{ст.min} + R_{обм} \cdot I_{ст.min}; \quad (4.7)$$

$$E_{max} = U_{ст.max} + R_{обм} \cdot I_{ст.max}; \quad (4.8)$$

ЗВЕРНІТЬ УВАГУ!

1. До таблиці 4.3 значення координат точок для зворотної вітки заносяться від'ємними – як струм, так і напруга.
2. Відповідно до п.1 дані точок зворотної вітки ВАХ до таблиці 4.3 заносяться у зворотному порядку – тобто справа наліво, та у програму Excel значення вносяться ЗЛІВА від даних таблиці 4.2 для прямої вітки ВАХ.

Занесіть до таблиці 4.3 параметри трьох точок, що лежать між точкою початку стабілізації та нулем, після цього – у порядку спадання, координати точок початку стабілізації, точки 1, фактичної робочої точки, точки 2 та точки кінця стабілізації.

Повторіть дії, описані в п. 1.2 для діапазону напруг від 0 до U В, де $U = U_{ст.min} + 1$, без проведення розрахунків. Визначте координати останньої доступної точки і занесіть їх до таблиці 4.3. Побудуйте в Excel отриману ВАХ (рис. 4.11) та занесіть її до звіту.

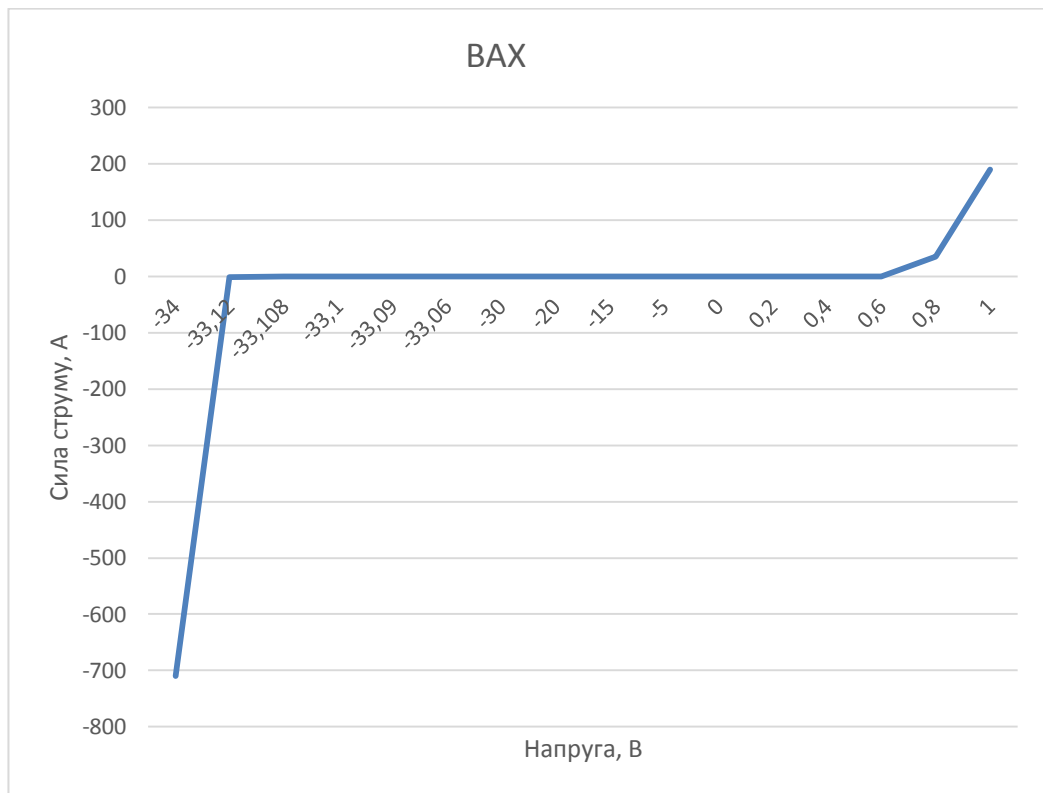


Рис. 4.11. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

1.3. Дослідження параметрів струму стабілізації

Складіть схему, зображену на рис. 4.12. Значення напруг на елементах V1 та V2 рівні відповідно параметрам E_{max} та E_{min} .

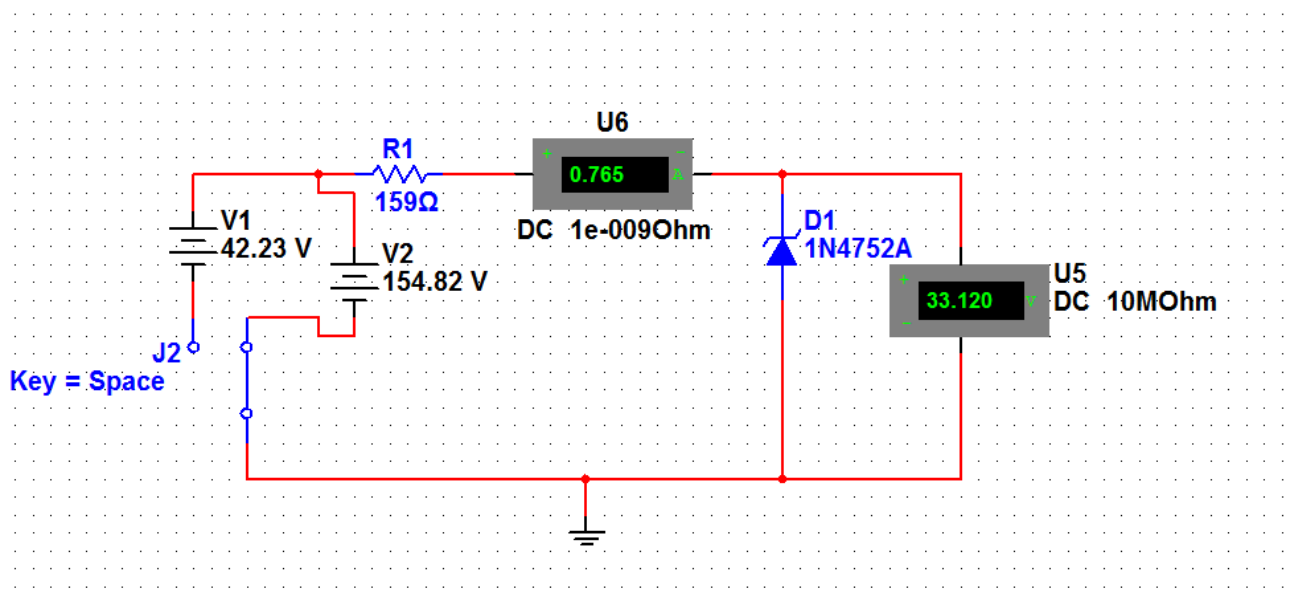


Рис. 4.12. Схема проведення експерименту

Занесіть до таблиці 4.5 отримані значення напруги та струму у схемі відповідно для V1 та V2 (робоче джерело змінюється за допомогою ключа).
Зробіть висновки по отриманим результатам.

Таблиця 4.5

V1	I, A		V2	I, A	
	U, B			U, B	

Зміст звіту

1. Основні характеристики стабілітрону згідно варіанту.
2. Схеми проведення експерименту (у середовищі Multisim).
3. Обчислення, проведені в лабораторній роботі.
4. Заповнені таблиці 4.1 – 4.4.
5. Графік ВАХ.
6. Висновки по роботі.

Література

Л [1] с. 73-82; Л [2] с. 79-82; Л [6] с. 55-58; Л [7]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи – вивчення принципу дії, основних параметрів та властивостей біполярних транзисторів в різних схемах увімкнення, експериментальне дослідження статичних характеристик і деяких параметрів біполярного транзистора.

Пристрої та елементи

Джерело постійної напруги, джерело постійного струму, заземлення – розділ **Sources**;

Транзистор – розділ **Transistors**;

Функціональний генератор (Function Generator)- панель **контрольно-вимірювальні прилади**;

Амперметр, вольтметр – розділ **Indicators**.

Короткі теоретичні відомості

Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад з трьома шарами напівпровідників різної провідності, принцип роботи якого базується на взаємодії двох $p - n$ переходів.

Транзистор дає змогу керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної напруги і зазвичай застосовується в підсилювачах і логічних електронних схемах. У мікросхемах у єдиний функціональний блок можуть бути об'єднані тисячі й мільйони окремих транзисторів.

Залежно від порядку розташування областей розрізняють $p-n-p$ і $n-p-n$ транзистори. Спрощені структури $p-n-p$ і $n-p-n$ транзисторів і їх умовні графічні зображення наведені на рис. 5.1.

У біполярних транзисторах перенесення електричного струму через кристал напівпровідника і підсилення сигналу обумовлені рухом носіїв заряду обох

полярностей – електронів і дірок.

Область транзистора, розташована між електронно-дірковими переходами, називається **базою**. Область транзистора, основним призначенням якої є інжекція носіїв у базу, називається **емітером**, а відповідний електронно-дірковий перехід – **емітерним**. Область транзистора, основним призначенням якої є екстракція носіїв з бази, називається **колектором**, а відповідний електронно-дірковий перехід – **колекторним**.

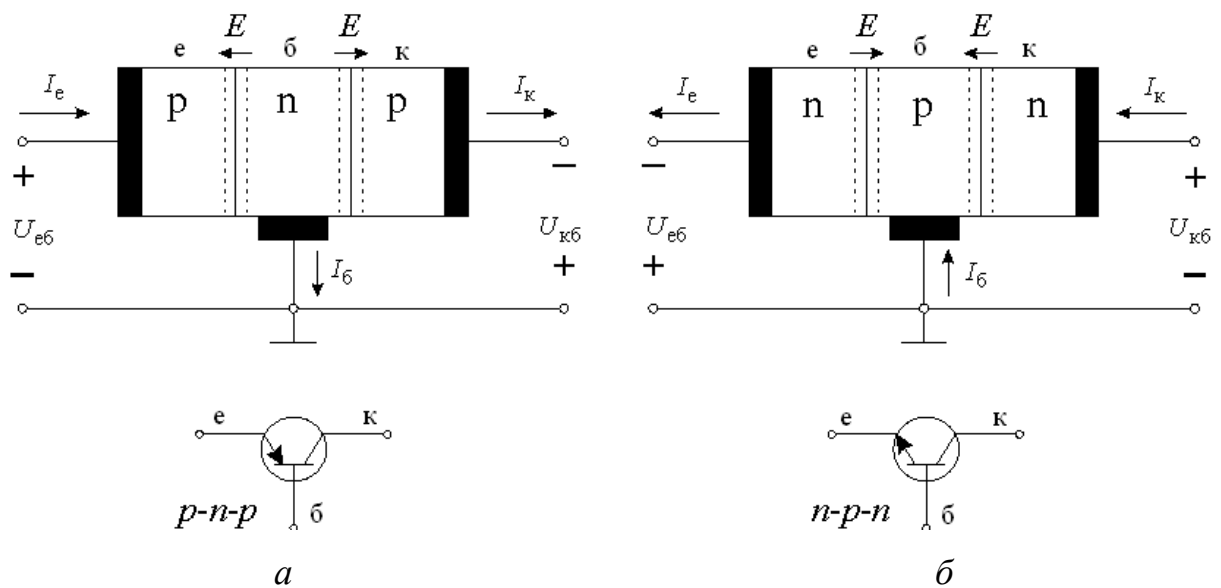


Рис. 5.1. Біполярні транзистори у підсилювальній схемі

та їх умовні графічні зображення:

a – p-n-p; б – n-p-n

Кожен з переходів транзистора можна увімкнути або в прямому, або в зворотному напрямку. Залежно від цього розрізняють чотири режими роботи транзистора:

- 1) **режим відсікання** – обидва електронно-діркових переходи закриті, при цьому через транзистор зазвичай тече порівняно невеликий струм;
- 2) **режим насичення** – обидва електронно-діркові переходи відкриті;
- 3) **активний режим** – емітерний перехід відкритий, а колекторний – закритий;
- 4) **інверсний режим** – колекторний перехід відкритий, а емітерний – закритий.

Схеми увімкнення біполярного транзистора. При увімкненні транзистора в схему один з його електродів вважається вхідним, другий – вихідним, а третій – спільним. На вхідний і вихідний електроди транзистора подаються напруги від зовнішніх джерел.

Залежно від того, який електрод є спільним для вхідного і вихідного кіл, розрізняють три схеми увімкнення біполярного транзистора: схема зі спільною базою (СБ), схема зі спільним емітером (СЕ), схема зі спільним колектором (СК).

У *схемі зі спільним емітером* (СЕ) (рис. 5.2) вхідним електродом є база, а вихідним – колектор.

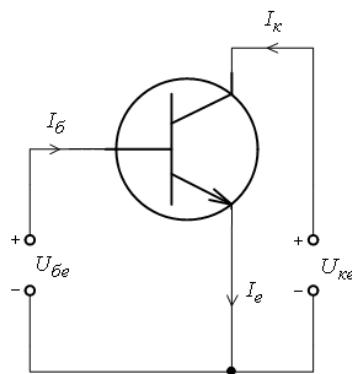


Рис. 5.2. Транзистор *n-p-n*-типу, увімкнений по схемі зі спільним емітером

При схемі підключення біполярного транзистора зі спільним емітером (СЕ) вхідний сигнал подається на базу, а знімається з колектора. Схема забезпечує в нормальному режимі підсилення як за напругою і потужністю, так і за струмом, тому що вхідний струм бази набагато менший за вихідний струм колектора. Оскільки біполярний транзистор керується вхідним струмом, то зі збільшенням I_b зростає концентрація основних носіїв, які надходять від джерела вхідного струму в базу (електронів для *p-n-p* і дірок для *n-p-n* транзисторів). Цим досягається пряме зміщення емітерного переходу. Починається інжекція неосновних носіїв із емітера в базу, концентрація яких значно переважає концентрацію основних носіїв, які надійшли, через більш високий рівень легування емітера відносно бази. Більша кількість неосновних носіїв,

дифундуючи через базу, досягне колекторного переходу, який перебуває під зворотним зміщенням і екстрагує їх із бази, створюючи струм I_K .

Проте при такій схемі нелінійні спотворення сигналу значно більші. Крім того, при даній схемі підключення, на характеристики підсилювача значно впливають зовнішні чинники, такі як напруга живлення, або температура довкілля. Зазвичай для компенсації цих чинників застосовують від'ємний зворотній зв'язок, який знижує коефіцієнт підсилення.

Біполярні транзистори керуються струмом. У схемі зі СЕ – струмом бази. Напруга на переході база-емітер при цьому залишається майже постійною та залежить від матеріалу напівпровідника, для германію близько 0,3 В, для кремнію близько 0,7 В, а на сам каскад подається напруга, що керує. Струм бази, колектора й емітера й інші струми та напруги в каскаді можна обчислити за законом Ома і законами Кірхгофа для розгалуженого багатоконтурного кола:

$$\Delta I_e = \Delta I_K + \Delta I_{\bar{b}}.$$

Вихідні дані:

$$I_{вих} = I_K, I_{вх} = I_{\bar{b}}, U_{вх} = U_{\bar{b}e}, U_{вих} = U_{ке}.$$

Транзистор у схемі зі СЕ характеризується за допомогою коефіцієнта прямої передачі струму $\beta = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}}$.

Основні параметри транзистора, увімкненого по схемі зі СЕ:

1) коефіцієнт підсилення по струму:

$$K_I = \beta,$$

2) коефіцієнт підсилення по напрузі:

$$K_U = \frac{U_{mex}}{U_{mex}} = \frac{I_K R_H}{I_{\bar{\sigma}} R_{ex}} = \frac{\beta R_H}{R_{ex}} ;$$

3) коефіцієнт підсилення потужності:

$$K_P = K_I K_U = \frac{\beta^2 R_H}{R_{ex}}.$$

Статичні характеристики транзистора. Якщо позначити напругу і струм вхідного електроду транзистора через U_1 і I_1 , а напругу і струм вихідного – через U_2 і I_2 , то взаємозалежність цих чотирьох величин можна виразити чотирма сімействами характеристик. В якості основних зручно вибирати сімейства характеристик, що зв'язують струм і напругу на вході – **вхідні характеристики** та струм і напругу на виході – **вихідні характеристики**. Інші два сімейства характеристик є наслідком вхідних та вихідних. Сімейства характеристик, які пов'язують струми або напруги на виході зі струмами або напругами на вході, називають **характеристиками передачі**, а сімейства, які пов'язують напруги або струми на вході з струмами або напругами на виході – **характеристиками зворотного зв'язку**.

Вихідні характеристики транзистора в схемі з СЕ. Вихідними характеристиками транзистора, увімкненого по схемі зі СЕ, називають сімейство характеристик, які виражають залежність $I_K = f(U_{ke}) \Big|_{I_{\bar{\sigma}} = \text{const}}$.

Сімейства вхідних і вихідних статичних характеристик транзистора, увімкненого по схемі зі спільним емітером, представлено на рис. 5.3.

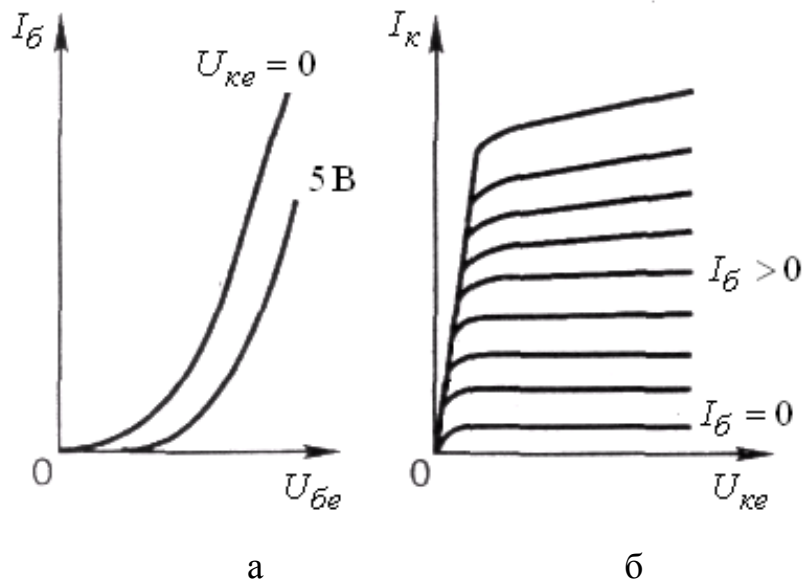


Рис. 5.3. Статичні характеристики транзистора:
а – вхідні; б – вихідні

Визначення робочої точки транзистора розглянемо на прикладі транзистора ГТ383А, включеного в підсилювальний каскад по схемі зі спільним емітером. Кінцевими точками навантажувальної кривої вважатимемо точки А(0;10) і Б(4;0).

Перемальовуємо з довідника сімейство статичних вихідних та вхідних характеристик транзистора (рис. 5.4).

Будуємо на статичних вихідних характеристиках динамічну характеристику транзистора (5.4, а). Вона проходить через дві точки:

- 1) А з координатами $U_{K-E} = 0$ В та $I_K = 10$ мА.
- 2) В з координатами $I_K = 0$ А та $U_{K-E} = E_K = 4$ В.

Обираємо на динамічній характеристиці робочу ділянку CD.

Визначаємо струм $I_{Б0}$ що є середнім по відношенню до струмів бази в точках С і D:

$$I_{Б0} = \frac{(0,25 + 0,05) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,15 \text{ мА}.$$

На перетині динамічної вихідної характеристики і статичної вихідної характеристики, що відповідає струму бази I_{B0} позначаємо робочу точку T . Її координати: $U_{K-E0} = 2$ В; $I_{K0} = 5,2$ мА.

В якості вхідної динамічної характеристики обираємо статичну вхідну характеристику для $U_{K-E} = 3$ В (рис. 5.4, б). На цій характеристиці відмічаємо точки D' , T' , C' , що відповідають значенням $I_B = 0,05$ мА, $I_{B0} = 0,15$ мА, $I_B = 0,25$ мА. Отримуємо координати робочої точки T' на вхідних характеристиках $U_{B-E0} = 4,3$ В; $I_{B0} = 0,15$ мА.

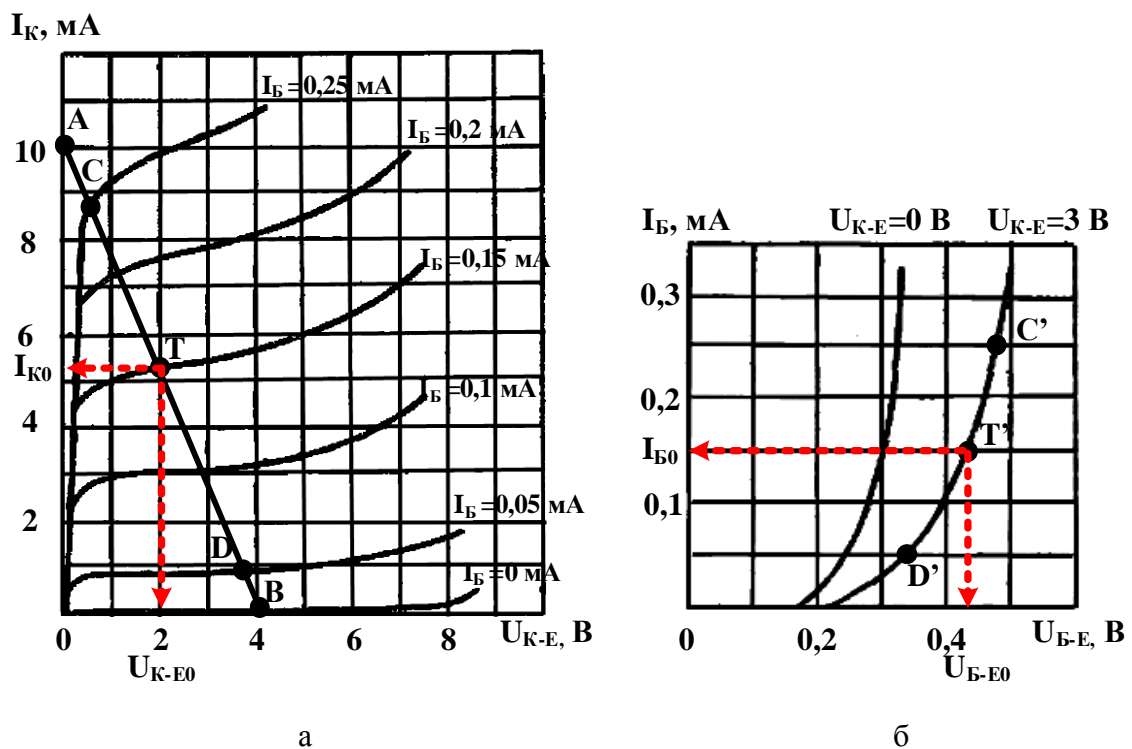


Рис. 5.4. Статичні характеристики транзистора ГТ383А:

а – вихідні; б – вхідні

Визначення h -параметрів транзистора. Транзистор у загальному випадку являє собою активний нелінійний чотириполюсник. Згідно теорії чотириполюсників, співвідношення між струмами і напругами на вході і виході чотириполюсника можуть бути записані у вигляді:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2, \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2. \end{cases}$$

Коефіцієнти $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$, що входять до цих рівнянь, називаються h -параметрами транзистора, а про систему говорять, що вона записана в формі h -параметрів. Кожний із цих параметрів має певний фізичний зміст.

Зокрема, параметр h_{11} являє собою величину **вхідного опору транзистора** при короткому замиканні на виході і вимірюється в омах:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бе}}}{\Delta I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{ке}}=U_{\text{ке0}}}.$$

h_{11} визначають по вхідній характеристиці транзистора, що відповідає напрузі $U_{\text{К-Е}} \neq 0$.

Параметр h_{12} називається **коефіцієнтом зворотнього зв'язку** і дорівнює відношенню вхідної напруги до вихідної при розімкненому вхідному колі:

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бе}}}{\Delta U_{\text{ке}}} \right|_{I_{\text{б}}=I_{\text{б0}}}.$$

h_{12} визначають по вхідним характеристикам транзистора.

Параметр h_{21} називається **коефіцієнтом підсилення по струму** і дорівнює відношенню вихідного струму до вхідного при короткозамкненому виході:

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{ке}}=U_{\text{ке0}}}.$$

h_{21} визначають по вихідним характеристикам транзистора.

Параметр h_{22} являє собою **вихідну провідність транзистора** при розімкнутих вхідних затискачах і вимірюється в См:

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_6 = I_{60}}.$$

h_{22} визначають по вихідним характеристикам транзистора.

Для розрахунку h – параметрів по статичним характеристикам транзистора використовується метод «двох точок», згідно якого значення параметра, визначеного вздовж відрізка, справедливе і для точки, що лежить посередині цього відрізка.

В якості прикладу визначимо h – параметри по статичним характеристикам транзистора ГТ383А.

Параметр h_{11} визначаємо по вхідній статичній характеристиці транзистора, що відповідає напрузі $U_{KE} = 3$ В (рис. 5.5, а).

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{B-E}}{\Delta I_B} \right|_{U_{K-E} = U_{K-E0}} = \frac{0,46 - 0,4}{(0,2 - 0,1) \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Ом}.$$

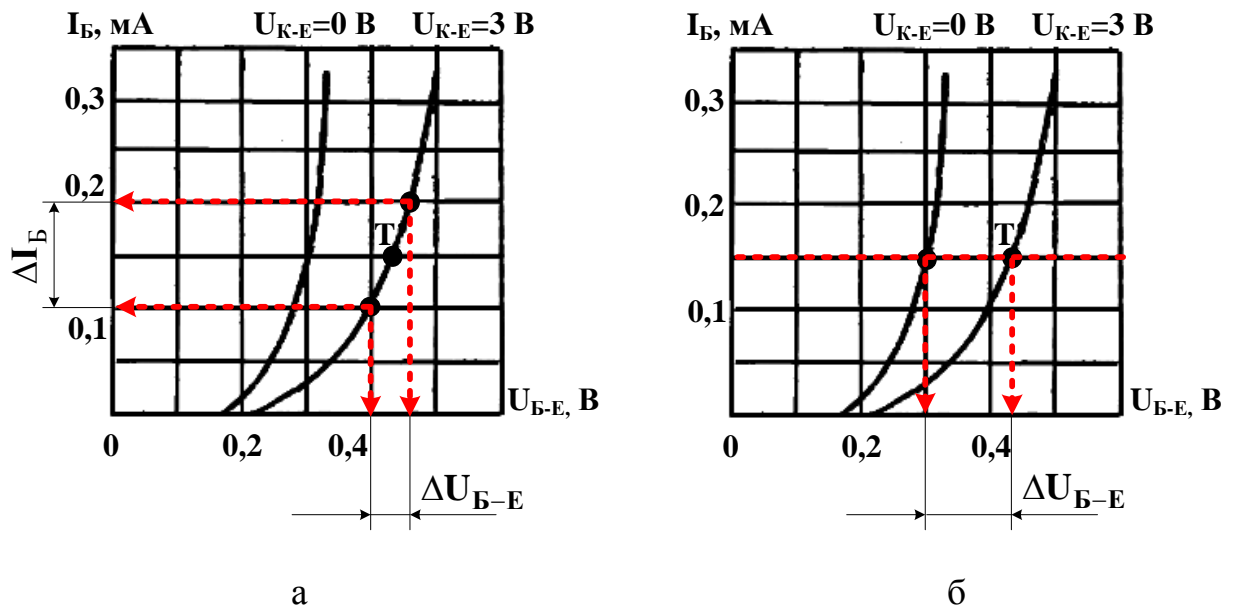


Рис. 5.5. Вхідні статичні характеристики транзистора ГТ383А

Параметр h_{12} визначаємо за допомогою рис. 5.5, б).

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{\text{Б-Е}}}{\Delta U_{\text{К-Е}}} \right|_{I_{\text{Б}}=I_{\text{Б}0}} = \frac{0,43-0,3}{3-0} = 0,043.$$

Параметр h_{21} визначаємо по вихідним характеристикам транзистора (рис. 5.6, а).

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{К-Е}}=U_{\text{К-Е}0}} = \frac{(7,5-3) \cdot 10^{-3}}{(0,2-0,1) \cdot 10^{-3}} = 45.$$

Параметр h_{22} визначаємо по вихідній характеристиці транзистора, що відповідає $I_{\text{Б}} = 0,15 \text{ мА}$ (рис. 5.6, б).

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{К-Е}}} \right|_{I_{\text{Б}}=I_{\text{Б}0}} = \frac{(5,5-5) \cdot 10^{-3}}{3-1} = 250 \text{ мкСм}.$$

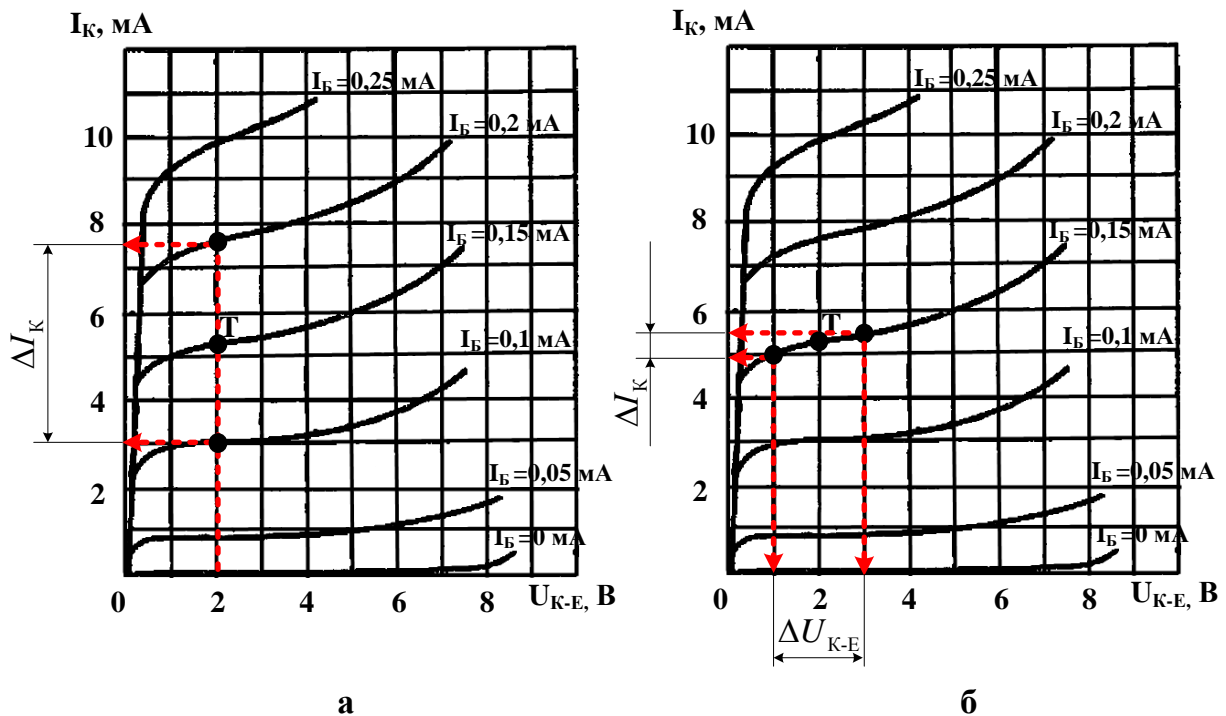


Рис. 5.6. Вихідні статичні характеристики транзистора ГТ383А

Контрольні питання

1. Що називають біполярним транзистором? Умовне графічне позначення біполярного транзистора.
2. Скільки виводів має біполярний транзистор? Як вони називаються?
3. Які режими роботи біполярного транзистора Вам відомі?
4. Які схеми включення біполярного транзистора Вам відомі?
5. Що показують статичні характеристики біполярного транзистора?
6. Який вигляд мають типові вхідні статичні характеристики для схеми зі спільним емітером?
7. Який вигляд мають типові вихідні статичні характеристики для схеми зі спільним емітером?
8. Що називають h -параметрами біполярного транзистора?
9. Фізичний зміст і розмірність параметра h_{11} .
10. Фізичний зміст і розмірність параметра h_{22} .
11. Фізичний зміст і розмірність параметра h_{12} .
12. Фізичний зміст і розмірність параметра h_{21} .

Підготовка до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити теоретичні відомості і дати відповіді на контрольні запитання.
2. Ознайомитись з основними параметрами та характеристиками транзисторів відповідно до варіанту та занести їх у протокол.

Порядок виконання роботи

1. Вимірювання статичних характеристик транзистора, увімкненого по схемі зі спільним емітером

Таблиця 5.1

Індивідуальні завдання для лабораторної роботи

Номер варіанту	Назва транзистору	Номер таблиці
1-3	BD135	2
4-6	BD135	3
7-9	2N2712	2
10-12	2N2712	3
13-15	BD135-16	2
16-18	BD135-16	3
19-21	2N2714	2
22-24	2N2714	3
25	BD137	2

1.1. Сімейство вхідних характеристик

Складіть схему, зображену на рис. 5.7.

Встановіть значення напруги колектор-емітер $U_{K-E} = 0$ В. Для цього у полі Frequency введіть значення 1 Гц, у полі Amplitude – значення 1 фемтвольт, Offset – 0 В та виберіть форму сигналу синусоїдною (рис 5.8). Змінюючи струм бази I_B в межах 0...1.2 мА виміряйте і занесіть до табл. 5.2(5.3) відповідні значення напруги база-емітер U_{B-E} . Виконайте аналогічні вимірювання для значень $U_{K-E} = 5$ В або $U_{K-E} = 10$ В (значення напруги змінюється у полі Offset).

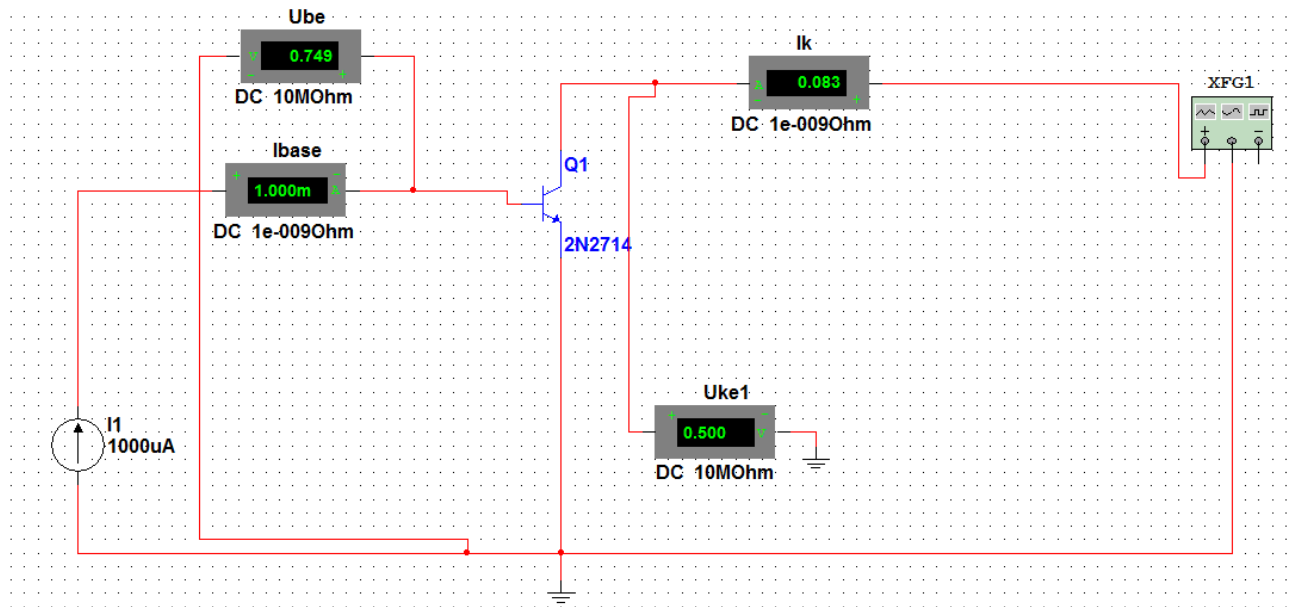


Рис. 5.7. Схема для проведення досліду в Multisim

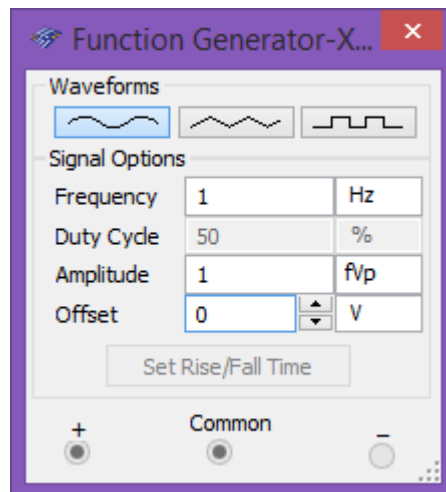


Рис. 5.8. Налаштування функціонального генератора

Таблиця 5.2

Сімейство вхідних характеристик транзистора (СЕ)

$U_{ке}, \text{В}$	$I_{\bar{o}}, \text{мА}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
0	$U_{\bar{o}e}, \text{В}$							
5	$U_{\bar{o}e}, \text{В}$							

Сімейство вхідних характеристик транзистора (СЕ)

$U_{ке}, В$	$I_{\bar{б}}, мА$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
0	$U_{\bar{б}е}, В$							
10	$U_{\bar{б}е}, В$							

1.2. Сімейство вихідних характеристик

Встановіть значення струму бази $I_B = 0$ мкА. Змінюючи напругу колектор-емітер в межах 0...10 В виміряйте і занесіть до табл. 5.4 відповідні значення струму колектора I_K . Виконайте аналогічні вимірювання для значень $I_B = 200$ мкА, 600 мкА, $I_B = 1000$ мкА.

1.3. Обробка експериментальних даних

За даними табл. 5.2 (5.3) і 5.4 побудуйте сімейства вхідних і вихідних характеристик транзистора, ввімкненого по схемі зі спільним емітером, відповідно до варіанту. Для цього зручно використовувати інструмент Scatter with Smooth Lines and Markers (рис.5.9).

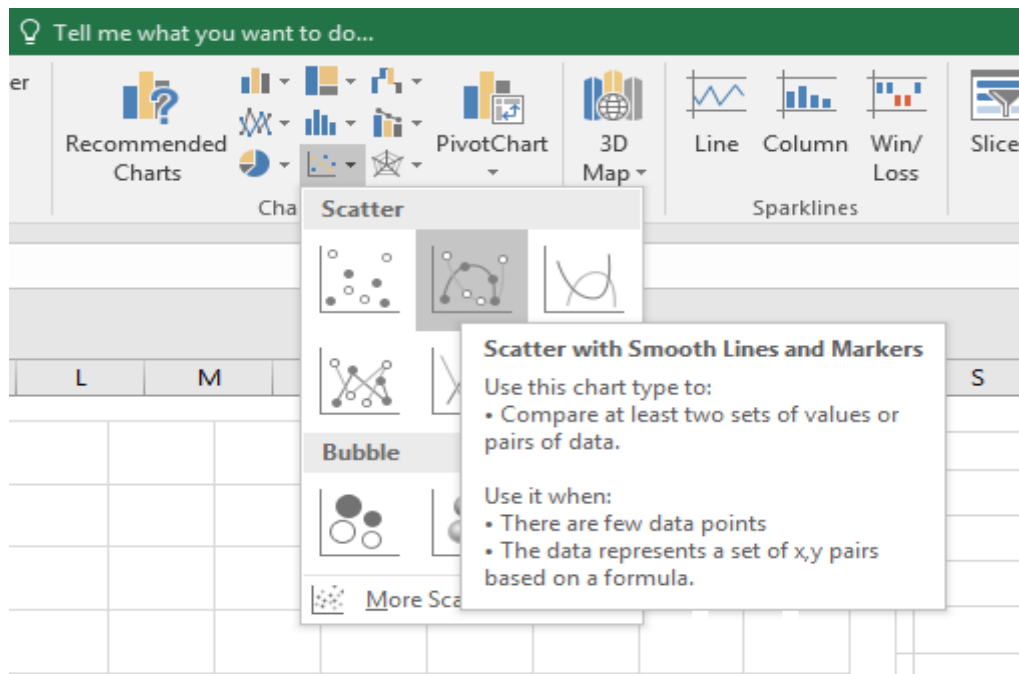


Рис. 5.9. Scatter with Smooth Lines and Markers

ЗВЕРНІТЬ УВАГУ!

1. Для побудови графіків вхідних характеристик необхідно по вісі Ox задавати значення $U_{Б-Е}$, а по вісі Oy – I_B .
2. Для побудови графіків вихідних характеристик необхідно по вісі Ox задавати значення $U_{К-Е}$, по вісі Oy – I_K .

За допомогою отриманих графіків визначте h -параметри транзистора. Координати кінцевих точок навантажувальної кривої прийняти наступними: А(0;120), Б (10;0).

Сімейство вихідних характеристик транзистора (СЕ)

I_B , мкА	U_{K-E} , В	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1	4	7	10
0	I_K , мА									
200	I_K , мА									
600	I_K , мА									
1000	I_K , мА									

Зміст звіту

1. Схеми проведення експерименту(у середовищі Multisim).
2. Основні характеристики транзистору відповідно до варіанту.
3. Заповнені таблиці 5.2 (5.3) і 5.4.
4. Графіки сімейств вхідних і вихідних характеристик транзистора відповідно до варіанту.
5. Розрахунок h -параметрів транзистора відповідно до варіанту.
6. Висновки по роботі.

Література

Л [1] с. 92-104, 108-113; Л [2] с. 95-132; Л [6] с. 89-114; Л [7]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи: вивчити та експериментально дослідити вольт-амперні характеристики і параметри польових транзисторів з керувальним *p-n*-переходом в схемі зі спільним витоком.

Пристрої та елементи

Джерело постійної напруги, джерело постійного струму, заземлення – розділ **Sources**;

Транзистор – розділ **Transistors**;

Амперметр, вольтметр – розділ **Indicators**.

Короткі теоретичні відомості

Польові транзистори є напівпровідниковими приладами, в яких проходження струму зумовлено дрейфом основних носіїв заряду під дією поздовжнього електричного поля. Управління струмом у польових транзисторах здійснюється шляхом зміни електропровідності струмопровідної ділянки напівпровідника поперечним електричним полем. Це поле створюється напругою, прикладеною до керуючого електроду.

Польові прилади можуть працювати в підсилювальному або ключовому режимах. Головна особливість польових приладів полягає в тому, що їх коло керування ізольоване від вихідного кола діелектриком або зміщеним у зворотному напрямку *p-n*-переходом. Фактично коло керування польового приладу являє собою конденсатор, заряд на обкладках якого змінюється під дією керуючого поля (напруги). Напівпровідникова обкладка цього конденсатора входить у вихідне коло приладу: зміна заряду обкладки призводить до зміни опору каналу і відповідно вихідної потужності.

Таким чином передача керуючого заряду в польових транзисторах здійснюється напругою (через ємність). Керування безпосередньо електричним полем визначає основні особливості експлуатації польових напівпровідникових приладів.

У технічній літературі розглянутий тип приладів визначають трьома термінами:

- на основі принципу керування такі прилади зазвичай називають **польовими** приладами;
- внаслідок того, що перенесення струму в них забезпечується одним типом носіїв заряду, поширена інша назва – **уніполярні** прилади;
- вихідні параметри таких приладів в основному визначаються властивостями каналу і можна зустріти термін **канальні** прилади.

У класі польових транзисторів розрізняють транзистори з **ізолюваним затвором** зі структурою метал-діелектрик-напівпровідник (**МДН**-транзистори) і транзистори з **керуючим *p-n*-переходом**. У МДН-транзисторах керуюче коло відокремлене від каналу діелектриком. Зазвичай в якості діелектрика використовують оксид (діоксид кремнію SiO_2) і говорять про **МОН**-транзисторах (зі структурою метал-оксид-напівпровідник).

На рис. 6.1 наведені основні позначення польових транзисторів. МДП-транзистори з індукованим каналом (нормально закриті) мають пунктирну лінію в позначенні каналу (рис. 6.1, б), польові транзистори з вбудованим каналом (нормально відкриті) – суцільну (рис. 6.1, в). Стрілка в позначенні польових транзисторів визначає тип каналу: спрямована до каналу – для каналу *n*-типу та від каналу – для *p*-типу. В умовному позначенні МДН-транзистора відображений факт ізоляції керуючого електрода – затвора від вихідних електродів стоку і витоку.

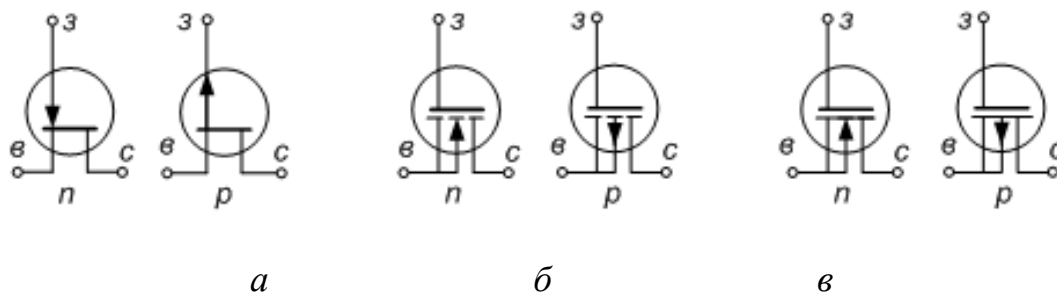


Рис. 6.1. Умовне графічне позначення польових транзисторів:

a – з керуючим p - n -переходом; *б* – МДН-транзистор з індукованим каналом; *в* – МДН-транзистор з вбудованим каналом

Польовий транзистор має три основних електрода: керуючий електрод – **затвор З**, вхідний – **випік В** і вихідний – **стік С**. Стоком називається електрод, до якого надходять носії заряду з каналу. Якщо канал, наприклад, n -типу, то носії заряду, що надходять з каналу – електрони, а полярність напруги стоку позитивна. Можливий також четвертий електрод (рис. 6.1, *б*, *в*), який з'єднується з пластиною вихідного напівпровідника – підкладкою.

У польових транзисторах з керуючим p - n -переходом (рис. 6.1, *a*) керуюче коло відокремлене від каналу зворотно зміщеним p - n -переходом. При цьому канал розташований в об'ємі напівпровідника та існує при нульовій напрузі на затворі, тобто є вбудованим каналом. На керуючий p - n -перехід можна подавати лише зворотну напругу, і тому польові транзистори з керуючим p - n -переходом працюють в режимі збіднення каналу носіями заряду.

МДН-транзистори бувають двох типів: з вбудованим і індукованим каналами. У МДН-транзисторі з індукованим каналом (рис. 6.1, *б*) при напрузі на затворі, що дорівнює нулю, канал відсутній. Тільки при прикладанні до затвору так званої порогової напруги утворюється (індукується) канал. При цьому полярність напруги на затворі повинна збігатися зі знаком основних носіїв в об'ємі напівпровідника-підкладки: на поверхні напівпровідника індукується заряд протилежного знаку, тобто тип провідності приповерхневого шару напівпровідника інвертується і утворює провідний канал.

Зменшення струму на виході МДН-транзистора з вбудованим каналом (рис.

6.1, в) забезпечується подачею на керуючий електрод – затвор напруги U_3 з полярністю, відповідною знаку носіїв заряду в каналі: для p -каналу $U_3 > 0$, для n -каналу $U_3 < 0$. Напруга затвору U_3 зазначеної полярності викликає збіднення каналу носіями заряду, опір каналу збільшується, і вихідний струм зменшується. Якщо змінити полярність напруги на затворі, то відбудеться збагачення каналу дірками і відповідно збільшення вихідного струму.

Таким чином, МДН-транзистори з вбудованим каналом можуть працювати як в режимі збіднення каналу носіями заряду, так і в режимі збагачення. МДН-транзистор з індукованим каналом працюють тільки в режимі збагачення.

З точки зору експлуатації напівпровідникових приладів необхідно підкреслити, що МДН-транзистор з індукованим каналом за відсутності напруги управління – це **нормально закритий прилад**. Польовий транзистор з вбудованим каналом (польовий транзистор з керувальним p - n -переходом або МДН-транзистор з вбудованим каналом) – **прилад нормально відкритий**, тобто для підтримки закритого стану таких транзисторів необхідно подавати зміщення в колі управління. Якщо коло управління з якої-небудь причини відключається, то нормально закритий прилад закривається, а в нормально відкритому приладі струм на виході різко зростає і прилад може вийти з ладу.

Польові транзистори широко застосовуються в пристроях промислової електроніки: в джерелах живлення і стабілізаторах, в перетворювачах для привода постійного і змінного струму, в потужних підсилювачах, у вихідних каскадах обчислювальних пристроїв, в системах управління перетворювачів та ін.

ВАХ польового транзистора і їх якісний опис. Основними характеристиками польового транзистора є характеристики передачі (стоко-затворні) – залежність струму стоку від напруги на затворі $I_c = f(U_3) \Big|_{U_c = \text{const}}$ і вихідні (стокові) характеристики – залежність струму стоку від напруги стоку $I_c = f(U_c) \Big|_{U_3 = \text{const}}$.

Типові стокові ВАХ транзистора $I_c = f(U_c) \Big|_{U_3 = \text{const}}$ показані на рис. 6.2.

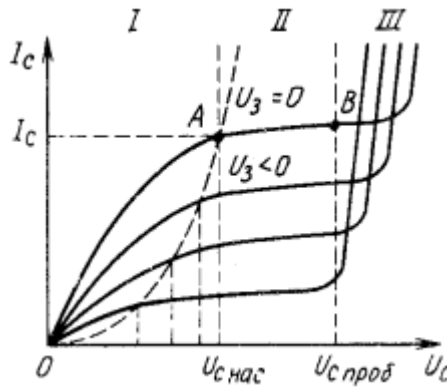


Рис. 6.2. Сімейство вихідних ВАХ польового транзистора

На цих характеристиках варто виділити три області: лінійну I (при малих напругах U_c); область насичення II, де струм стоку незначно залежить від U_c ; область пробую III, де струм стоку різко зростає зі зростанням U_c .

Розглянемо ВАХ для випадку, коли $U_3 = 0$. Якщо напруга U_c мала (область I), то зміна ширини p - n -переходу мала в порівнянні з товщиною каналу і опір останнього практично не відрізняється від початкового. Тому зв'язок між струмом I_c і напругою U_c буде майже лінійним. При збільшенні U_c «горловина» каналу звужується, що помітно позначається на зростанні опору каналу і зростання струму I_c від U_c поступово сповільнюється. Змиканню «горловини» каналу відповідає точка перегину, і ВАХ виходить на ділянку насичення. Напруга U_c , відповідне цій точці, називають напругою насичення $U_{c нас}$.

На ділянці II, коли $U_c > U_{c нас}$ струм I_c з ростом U_c майже не змінюється. Це пояснюється зростанням диференційного опору каналу за рахунок поширення «горловини» каналу від стоку до виток. Потенціал «горловини» зберігає значення $U_{c нас}$, а різниця потенціалів $U_c - U_{c нас}$ падає на ділянці між стоком і «горловиною». Поширення «горловини» у бік виток буде відбуватися до тих пір, доки області об'ємного заряду p - n -переходів не заповнять весь об'єм провідного каналу або не відбудеться пробій переходів (область III). $U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$

Розглянемо тепер характеристики, коли на затвор подано від'ємне зміщення. У цьому випадку напруга на переході буде визначатися напругою на

затворі і падінням напруги вздовж каналу при протіканні струму стоку:

$$U_{cнас} = |U_{з від}| - |U_з|,$$

де $U_{з від}$ – напруга відсікання.

Оскільки $U_{з від}$ для конкретного транзистора величина постійна, то впливає, що $U_{cнас}$ буде зменшуватися при збільшенні напруги $U_з$. У тому випадку, коли $U_{з від} = U_з$ відбувається повне відсікання струму I_c .

Характеристики польового транзистора не еквідистантні. Це пояснюється нелінійною залежністю ширини p - n -переходу від напруги. Тому при рівному збільшенні відстань між характеристиками не однакова.

Зі зростанням (за модулем) напруги на затворі пробій p - n -переходу відбувається при менших напругах U_c .

Характеристика передачі (або стоко-затворні характеристики) показані на рис. 6.3. Вони являють собою залежність струму стоку від напруги затвору. Характер цієї залежності визначається принципом роботи польового транзистора.

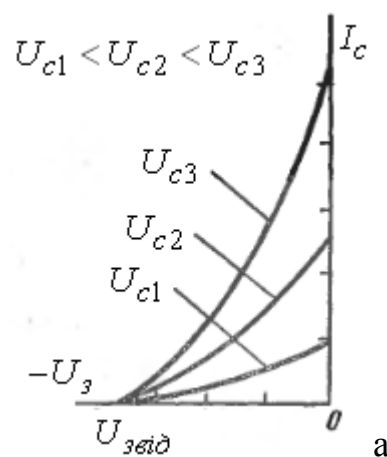


Рис. 6.3. Сімейство характеристик передачі польового транзистора.

Максимальний струм стоку I_c при заданій напрузі U_c відповідає $U_з = 0$. При збільшенні $U_з$ за абсолютним значенням I_c зменшується і, коли $U_з = U_{з від}$,

струм стоку стає рівним нулю.

Контрольні питання

1. Що називають польовим транзистором?
2. Назвіть області застосування польового транзистора.
3. Як називаються виводи польового транзистора?
4. Яким чином здійснюється керування струмом у польовому транзисторі?
5. Що називається характеристикою передачі польового транзистора?
6. Що називається вихідною характеристикою польового транзистора?
7. Що таке напруга відсікання і напруга насичення?

Підготовка до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити теоретичні відомості і дати відповіді на контрольні запитання.
2. Ознайомитись з основними параметрами та характеристиками досліджуваного польового транзистора згідно варіанту та занести їх в протокол.

Порядок виконання роботи

1. Отримання сімейства характеристик передачі польового транзистора

Складіть схему, зображену на рис. 6.4, використовуючи транзистор, вказаний в табл. 6.1.

За допомогою ключа J1 активуйте джерело V1, після цього встановіть за допомогою джерела живлення (V2 на схемі) напругу $U_{cv} = 1,5 \text{ В}$. Змінюючи напругу затвор-виток за допомогою джерела V1 в діапазоні $0 \dots 1,5 \text{ В}$ (підтримуючи при цьому напругу U_{cv} незмінною), фіксуйте відповідні струму стока I_c . Отримані дані занесіть у табл. 6.2.

Таблиця 6.1

Індивідуальні завдання для лабораторної роботи

Номер варіанту	Назва транзистору	Номер таблиці 1	Номер таблиці 2
1-3	2N5454	2	4
4-6	2N5454	2	5
7-9	2N5454	3	4
10-12	2N5454	3	5
13-15	2N5484	2	4
16-18	2N5484	2	5
19-21	2N5484	3	4
22-24	2N5484	3	5
25	2N5485	2	4

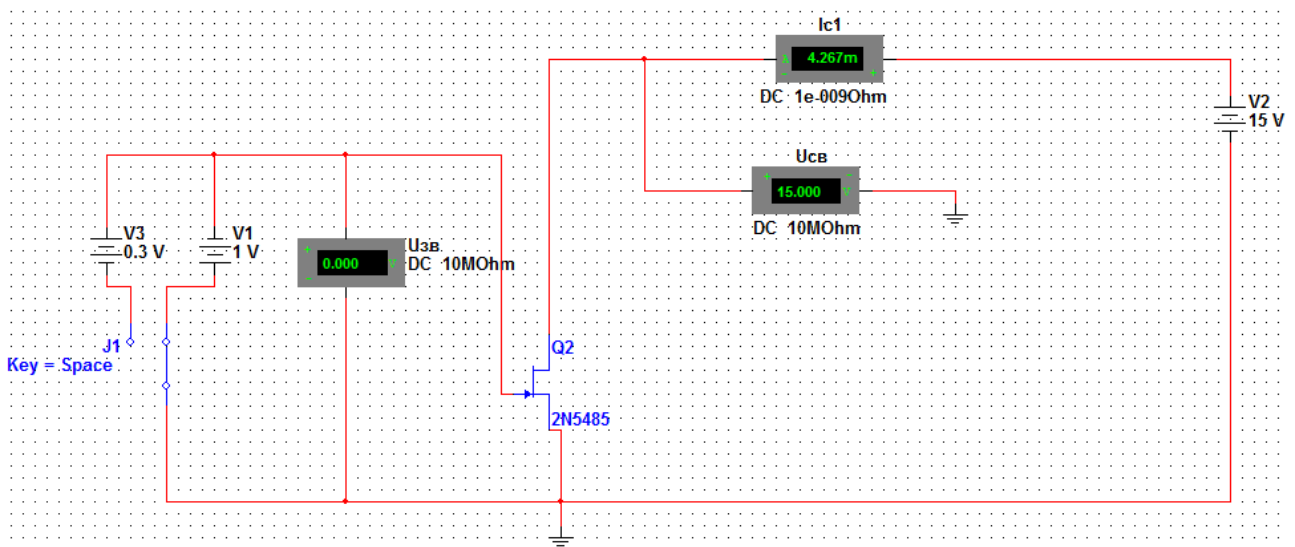


Рис. 6.4. Схема проведення експерименту

Встановіть за допомогою джерела живлення (V2 на схемі) напругу $U_{ce} = 3\text{В}$ і зніміть ще одну характеристику передачі польового транзистора. Виконайте ті ж самі дії для значень $U_{ce} = 6\text{В}$; 10В (відповідно до варіанту). Отримані дані занесіть у табл. 6.2 або 6.3 (відповідно до варіанту).

ЗВЕРНІТЬ УВАГУ!

При побудові графіків характеристик передачі значення $U_{зб}$, В брати від'ємними!

2. Отримання сімейства вихідних (стокових) характеристик польового транзистора

За допомогою ключа J1 активуйте джерело V2. Встановіть за допомогою джерела живлення V3 напругу затвор-виток $U_{зб} = 0$ В. Змінюючи напругу сток-виток за допомогою джерела V2 в діапазоні 0...15 В, фіксуйте відповідні струми I_c . Отримані дані занесіть у табл. 6.4 або 6.5 (відповідно до варіанту).

Встановіть за допомогою джерела живлення V3 напругу $U_{зб} = 0,3$ В і зніміть ще одну вихідну характеристику польового транзистора. Виконайте ті ж самі дії для значень $U_{зб} = 0,5$ В або $U_{зб} = 1$ В (відповідно до варіанту). Отримані дані занесіть у табл. 6.4 або 6.5 (відповідно до варіанту).

Таблиця 6.2

Сімейство характеристик передачі транзистора

$U_{сб} = 1,5$ В															
$U_{зб}$, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4	1,5
I_c , мА															
$U_{сб} = 3$ В															
$U_{зб}$, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4	1,5
I_c , мА															
$U_{сб} = 6$ В															
$U_{зб}$, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4	1,5
I_c , мА															

Сімейство характеристик передачі транзистора

$U_{ce} = 1,5 \text{ В}$															
$U_{36}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4	1,5
$I_c, \text{ мА}$															
$U_{ce} = 3 \text{ В}$															
$U_{36}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4	1,5
$I_c, \text{ мА}$															
$U_{ce} = 10 \text{ В}$															
$U_{36}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4	1,5
$I_c, \text{ мА}$															

Таблиця 6.4

Сімейство вихідних характеристик транзистора

$U_{36} = 0 \text{ В}$															
$U_{ce}, \text{ В}$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
$I_c, \text{ мА}$															
$U_{36} = 0,3 \text{ В}$															
$U_{ce}, \text{ В}$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
$I_c, \text{ мА}$															
$U_{36} = 0,5 \text{ В}$															
$U_{ce}, \text{ В}$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
$I_c, \text{ мА}$															

Сімейство вихідних характеристик транзистора

$U_{36} = 0 \text{ В}$															
$U_{ce}, \text{В}$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
$I_c, \text{мА}$															
$U_{36} = 0,3 \text{ В}$															
$U_{ce}, \text{В}$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
$I_c, \text{мА}$															
$U_{36} = 1 \text{ В}$															
$U_{ce}, \text{В}$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
$I_c, \text{мА}$															

3. Обробка отриманих результатів

а) За даними табл. 6.2-6.5 (відповідно до варіанту) побудуйте графіки ВАХ досліджуваних транзисторів.

б) Зробіть висновки по роботі, оформіть звіт.

Зміст звіту

1. Основні характеристики польового транзистора згідно варіанту.
2. Схеми проведення експерименту(у середовищі Multisim).
3. Заповнені таблиці 2-5 (відповідно до варіанту).
4. Графіки сімейства характеристик передачі та вихідних характеристик польового транзистора відповідно до варіанту.
5. Висновки по роботі (що може бути причиною похибок, можливі причини отримання саме таких результатів, характеристики отриманих результатів і т.д).

Література

Л [1] с. 121-129, 108-113; Л [2] с. 132-140; Л [6] с. 114-120; Л [7]

ДОДАТКИ

Додаток Д.1. Розрахункові формули для лабораторної роботи №3

Однонапівперіодний випрямляч без фільтра:

$$\begin{aligned}f &= \frac{1}{T}; \\U_{\text{нсер}} &= \frac{U_{m\text{BX}}}{\pi}; \\I_{\text{н.т}} &= \frac{U_{2m}}{R_{\text{H}}}; \\I_{\text{н сер}} &= \frac{I_{\text{н т}}}{\pi}; \\U_{\text{звор. max}} &= U_{2m} = \pi U_{\text{н сер}};\end{aligned}$$

Двохнапівперіодний випрямляч без фільтра:

$$\begin{aligned}f &= \frac{1}{T}; \\U_{\text{нсер}} &= \frac{2U_{m\text{BX}}}{\pi}; \\I_{\text{н.т}} &= \frac{2U_{2m}}{R_{\text{H}}}; \\I_{\text{н сер}} &= \frac{2I_{\text{н т}}}{\pi}; \\U_{\text{звор. max}} &= 2U_{2m} = \pi U_{\text{н сер}};\end{aligned}$$

Однонапівперіодний випрямляч з фільтром

$$\begin{aligned}\Delta U_{\text{H}} &= U_{\text{H max}} - U_{\text{H min}}; \\U_{\text{н сер}} &= \frac{(U_{\text{H max}} + U_{\text{H min}})}{2} = U_{\text{H max}} - \frac{\Delta U_{\text{H}}}{2}; \\K_{\text{П}} &= \frac{\Delta U_{\text{H}}}{U_{\text{н сер}}};\end{aligned}$$

Двохнапівперіодний випрямляч з фільтром

$$\Delta U_{\text{H}} = U_{\text{H} \max} - U_{\text{H} \min};$$

$$U_{\text{H} \text{ cep}} = \frac{(U_{\text{H} \max} + U_{\text{H} \min})}{2} = U_{\text{H} \max} - \frac{\Delta U_{\text{H}}}{2};$$

$$K_{\Pi} = \frac{\Delta U_{\text{H}}}{U_{\text{H} \text{ cep}}};$$

Додаток Д.2 Зразок оформлення титульного аркушу до звіту з лабораторної роботи

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Факультет електроніки

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

Лабораторна робота №__

з курсу “Фізичні основи електроніки”

(назва роботи)

Виконав(ла)

студент(ка) 2 курсу

групи _____

(Прізвище та ім'я)

Київ – 202_

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фізичні основи електроніки: курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К.С. Дрозденко, – Електронні текстові данні (1 файл: 8,58 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 153 с.
2. Щупляк Н. М. Основи електроніки і мікроелектроніки. – Дрогобич: Бескид БІТ, 2014. – 443 с.
3. Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – 257 с.
4. Борисов О.В., Якименко Ю.І. Твердотільна електроніка: Підручник. – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – 484 с.
5. Гершунский Б.С. Основы электроники. – К.: Высшая школа, 1977. – 344 с.
6. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
7. Шестеркин А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 360 с.